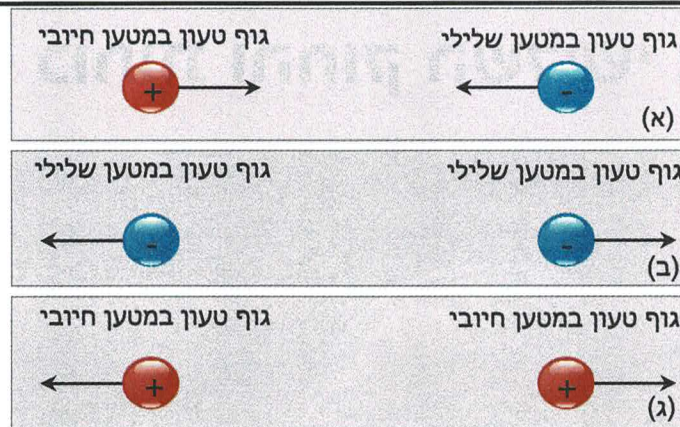
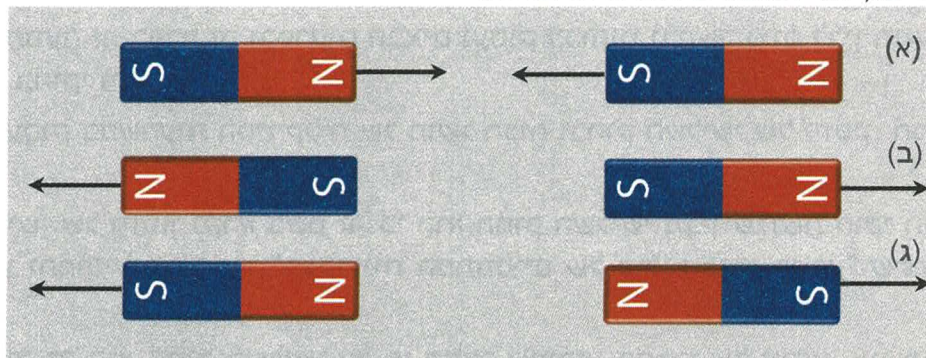


מכניקה ניוטונית – כרך א פרק 5: כוחות והחוק השלישי של ניוטון



איור 1: (א) שני גופים טעונים אחד חיובי והאחר שלילי מושכים זה את זה. (ב) שני גופים טעונים במעטן שלילי דוחים זה את זה. (ג) שני גופים טעונים במעטן חיובי דוחים זה את זה.

גם אם מקרבים שני מגנטים זה לזה, הם נמשכים האחד לשני או דוחים זה את זה. אם מקרבים שני קטבים מגנטיים שונים זה לזה, כלומר קוטב מגנטי צפוני של מגנט אחד (N) לקוטב מגנטי דרומי של מגנט אחר (S), כפי שמתואר באיור 2א, המגנטים נמשכים זה לזה, ואם שני הקטבים המגנטיים הקרובים זה לזה הם זהים; שניהם דרומיים כפי שמתואר באיור 2ב, או שניהם צפוניים כפי שמתואר באיור 2ג, שני המגנטים דוחים זה את זה.



איור 2: (א) שני קטבים מגנטיים צפוני ודרומי מושכים זה את זה. (ב) שני קטבים מגנטיים דרומיים דוחים זה את זה. (ג) שני קטבים מגנטיים צפוניים דוחים זה את זה.

אחת השאלות הקשות שמעסיקה את הפיזיקאים היא איך נוצרת הדחייה או המשיכה בין הגופים במקרים הקודמים (בין המטענים החשמליים או המגנטיים) או במקרים דומים אחרים. התשובה לשאלה זו עדיין אינה בהישג יד. ישנן תיאוריות אחדות שמנסות לענות על שאלה זו, אבל למרות זאת התהליך המתרחש ואשר כתוצאה ממנו נוצרת משיכה או דחייה בין הגופים במקרים אלה עדיין אינו ידוע ונותר אחד מסודות הטבע.

בניסיון להתגבר על הקושי בהבנת השאלה "איך נוצרת המשיכה או הדחייה בין הגופים" במקרים הקודמים ובמקרים דומים אחרים, אייזק ניוטון (וגם הפיזיקאים שבאו אחריו) השתמשו במונח **אינטראקציה**.

במקרים בהם יש משיכה או דחייה בין שני גופים 1 ו-2, ברור שכל אחד משני הגופים משפיע על הגוף האחר, אחרת איך כל אחד מהם "ידע" על קיומו של הגוף האחר "והחליט" להימשך אליו או להידחות ממנו, וגם בו בזמן "החליט" למשוך את הגוף האחר או לדחות אותו.

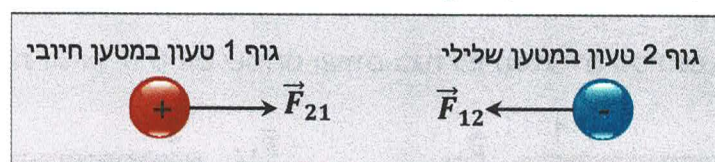
לכן במקרים בהם גופים נמשכים זה לזה או דוחים זה את זה, אנו אומרים שיש בין הגופים השפעה הדדית (אינטראקציה) הגורמת להם להימשך זה לזה או לדחות זה את זה.

אם מדובר בשני גופים בלבד, כל אחד משני הגופים משפיע על הגוף האחר, והשפעה הדדית זו היא שגורמת לכל אחד משני הגופים להימשך לגוף האחר או להידחות ממנו.

1.2 הכוח

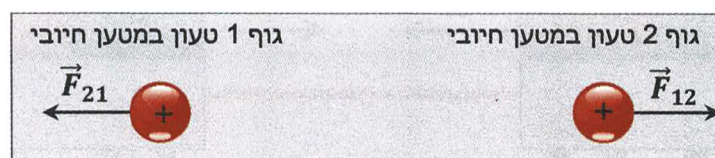
על מנת לתאר באופן כמותי את עוצמת ההשפעה של כל אחד משני הגופים על הגוף האחר בדוגמאות שבתת הסעיף הקודם או במקרים דומים, ניוטון השתמש במושג הכוח. במקום שנאמר שכל אחד משני הגופים משפיע על הגוף האחר וגורם למשיכה או לדחייה שלו, ניוטון תיאר זאת בכך שכל אחד משני הגופים מפעיל על הגוף האחר כוח, וכוח זה הוא שגורם לכל אחד משני הגופים להימשך לגוף האחר או להידחות ממנו.

על מנת להמחיש תיאור זה, נחזור לדוגמאות בתת סעיף הקודם, במקום שנאמר שבין שני מטענים, 1 שהוא חיובי ו-2 שהוא שלילי, המתוארים באיור 1א, יש השפעה הדדית שגורמת להם להימשך זה לזה; ניתן לומר שמטען 1 מפעיל על מטען 2 כוח המסומן ב- $\vec{F}_{12}$ שהוא כוח משיכה ובו בזמן מטען 2 מפעיל על מטען 1 כוח המסומן ב- $\vec{F}_{21}$, שגם הוא כוח משיכה (ראה איור 3).



איור 3: השפעה הדדית מתוארת על ידי כוחות.

באותה גישה, במקום שנאמר שבין שני מטענים חיוביים 1 ו-2, המתוארים באיור 1ג, יש השפעה הדדית שגורמת להם לדחות זה את זה, אנו אומרים שמטען 1 מפעיל על מטען 2 כוח המסומן ב- $\vec{F}_{12}$ שהוא כוח דחייה, ובו בזמן מטען 2 מפעיל על מטען 1 כוח המסומן ב- $\vec{F}_{21}$ שאף הוא כוח דחייה (ראה איור 4).



איור 4: השפעה הדדית מתוארת על ידי כוחות.

תיאור ההשפעה ההדדית בין שני גופים על ידי שימוש במושג הכוח הוא צעד חשוב מאוד בתיאור ההשפעה ההדדית בין שני גופים מהסיבות הבאות:

1. מושג הכוח מאפשר, כפי שנלמד בהמשך, לבטא באופן כמותי את הכיוון ואת עוצמת ההשפעה של כל אחד משני הגופים על הגוף האחר.
 2. מאפשר למדוד את עוצמת ההשפעה באמצעות מכשירי מדידה מתאימים.
 3. מאפשר ניסוח חוקים פיזיקליים הקשורים לאינטראקציה בין שני הגופים.
- לכן ניתן לסכם שהכוח הוא גודל פיזיקלי המבטא את הכיוון ואת עוצמת ההשפעה של כל אחד משני הגופים על הגוף האחר במקרים בהם יש השפעה הדדית בין שני הגופים.

1.3 כוחות אינטראקציה והחוק השלישי של ניוטון

על מנת להבחין בין כל אחד משני הכוחות הפועלים על כל אחד משני הגופים במקרים בהם יש אינטראקציה בין גופים אלה, ניוטון קרא לאחד כוחות אלה **פעולה** ולכוח האחר קרא **תגובה**. מבחינת המשמעות המילולית, הפעולה קודמת לתגובה, אבל במקרה של כוחות הפעולה והתגובה, הם סימטריים וזהים לחלוטין (עד כדי כיוון פעולתם, מאחר וכיווניהם מנוגדים). הם פועלים בו זמנית על שני הגופים, וכל אחד מהם יכול להיקרא פעולה והאחר תגובה.

מכיוון שהשמות פעולה ותגובה יכולים לגרום לאי הבנה לגבי הסימטריה של כוחות אלה, נהוג

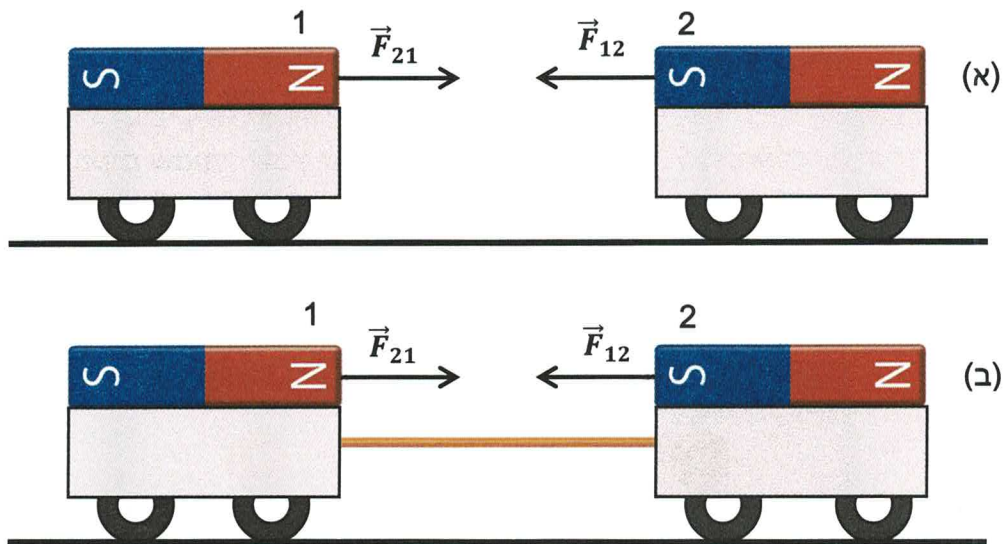
מכניקה ניוטונית – כרך א פרק 5: כוחות והחוק השלישי של ניוטון

כיום לקרוא לכוחות אלה בשם **כוחות אינטראקציה**.

לכל זוג כוחות אינטראקציה יש תכונה חשובה והיא שכוחות אלה תמיד שווים בגודלם ומנוגדים בכיוונם.

נראה זאת לגבי כוחות האינטראקציה הפועלים בין שני מגנטים. הכללה ניתן לעשות לכל מקרה אחר שפועלים בו כוחות אינטראקציה אחרים.

נתונות שתי עגלות אליהן מוצמדים שני מגנטים 1 ו-2 כך שהקטבים הצפוני והדרומי שלהם נמצאים זה מול זה כפי שמתואר באיור 5א. בין שני המגנטים קיימת משיכה כך שמגנט 1 מפעיל על המגנט 2 כוח משיכה $\vec{F}_{12}$, ומגנט 2 מפעיל על המגנט 1 כוח משיכה $\vec{F}_{21}$ (ראה איור 5א). אם נשחרר את שתי העגלות ממנוחה הן ינועו בהשפעת כוחות אלה אחת כלפי השנייה. כעת, אם נניח בין שתי העגלות מוט (כפי שמתואר באיור 5ב) ונשחרר את המערכת ממנוחה, נמצא שלמרות פעולת הכוחות $\vec{F}_{12}$ ו- $\vec{F}_{21}$ המערכת תישאר במנוחה, כלומר שני הכוחות $\vec{F}_{12}$ ו- $\vec{F}_{21}$ ביטלו זה את זה. שני כוחות מבטלים זה את זה אך ורק אם שניהם שווים בגודלם ומנוגדים בכיוונם, מכאן ש- $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$.



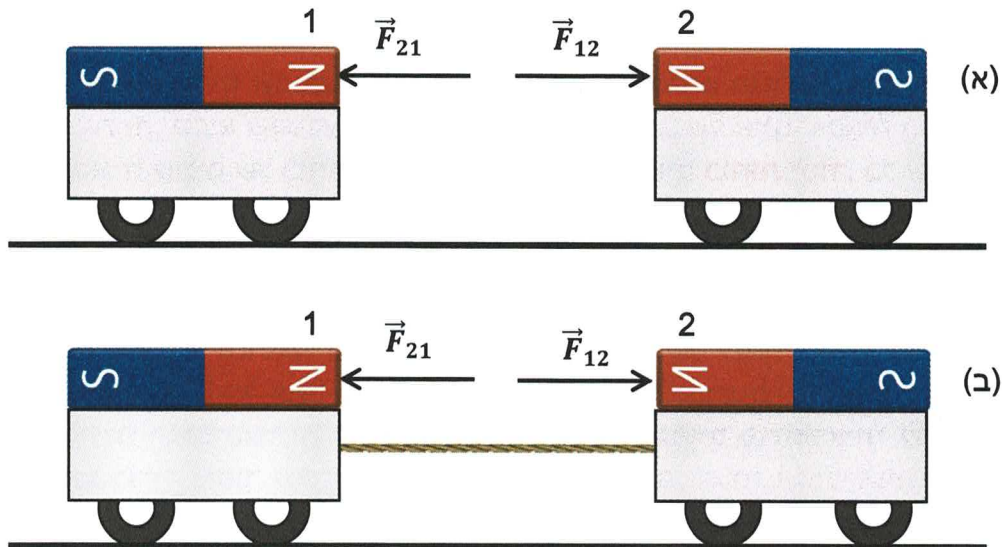
איור 5: (א) שתי עגלות נמשכות זו לזו בגלל כוחות האינטראקציה בין שני המגנטים. (ב) שתי העגלות נשארות במנוחה, כשמוט מונח ביניהן, למרות כוחות האינטראקציה בין שני המגנטים.

אם הקטבים הזחים של שני המגנטים נמצאים זה מול זה, כפי שמתואר באיור 6א, בין שני המגנטים קיימת דחייה כך שמגנט 1 מפעיל על המגנט 2 כוח דחייה $\vec{F}_{12}$, והמגנט 2 מפעיל על המגנט 1 כוח דחייה $\vec{F}_{21}$ (ראה איור 6א). אם נשחרר את שתי העגלות ממנוחה הן יתרחקו זו מזו בהשפעת כוחות אלה. כעת, אם נקשור את שתי העגלות בחוט, כפי שמתואר באיור 6ב ונשחרר אותן ממנוחה, נמצא שלמרות פעולת הכוחות $\vec{F}_{12}$ ו- $\vec{F}_{21}$ שהמערכת תישאר במנוחה, כלומר שני הכוחות $\vec{F}_{12}$ ו- $\vec{F}_{21}$ ביטלו זה את זה. שני כוחות מבטלים זה את זה אך ורק אם שניהם שווים בגודלם ומנוגדים בכיוונם, מכאן ש- $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$.

אנו מאמינים כיום, כפי שהאמין ניוטון, שתכונה זו מתקיימת בכל כוחות האינטראקציה הנובעים מהשפעה הדדית בין שני גופים; הם שווים בגודלם ומנוגדים בכיוונם. ניוטון ניסח עובדה זו בחוק פיזיקלי שנקרא כיום "החוק השלישי של ניוטון"; להלן ניסוח שקול לניסוח שנתן ניוטון:

בכל המקרים שיש בהם השפעה הדדית בין שני גופים, שני הגופים מפעילים זה על זה כוחות השווים בגודלם והמנוגדים בכיוונם.

כאמור, כוחות אלה נקראים כוחות אינטראקציה או כוחות פעולה ותגובה.



איור 6: (א) שתי עגלות מתרחקות זו מזו בגלל כוחות האינטראקציה בין שני המגנטים. (ב) שתי העגלות נשארות במנוחה, כשהן קשורות זו לזו בחוט, למרות כוחות האינטראקציה בין שני המגנטים.

הניסוח המופיע לחוק זה בספרו של ניוטון הוא:

לכל פעולה יש תגובה השווה לה בגודל ומנוגדת בכיוון.

כיום ידוע לנו שישנם מקרים שבהם החוק השלישי של ניוטון אינו מתקיים. דוגמה לכך היא האינטראקציה בין שני גופים הנמצאים במרחק גדול מאוד זה מזה. במקרים כאלה, בגלל שמהירות מעבר האינטראקציה (שהיא מהירות האור) היא סופית, נקבל שאין סימטריה בין כוחות הפעולה והתגובה. על מנת להבהיר עניין זה, נבחן לדוגמה את האינטראקציה בין השמש לכדור הארץ. באינטראקציה זו כדור הארץ מפעיל כוח על השמש, והשמש מפעילה כוח על כדור הארץ. כוח זה הוא שמחזיק את כדור הארץ במסלולו סביב השמש.

ידוע שהזמן הדרוש לאור להגיע אלינו מהשמש הוא כ-500 שניות. זהו גם הזמן הדרוש למעבר האינטראקציה בין השמש לכדור הארץ. לצורך הדיון, נניח שמסיבה כלשהי השמש נעלמת באופן פתאומי. במקרה זה הכוח הפועל על השמש מתאפס, ולעומת זאת ימשיך לפעול על כדור הארץ כוח למשך כ-500 שניות מרגע היעלמות השמש, עד שהאינפורמציה על היעלמותה תגיע לכדור הארץ. במשך זמן זה ימשיך כדור הארץ בתנועה במסלולו כאילו השמש עדיין קיימת. בפרק זמן זה החוק השלישי של ניוטון אינו מתקיים.

1.4 תכונות כוחות האינטראקציה

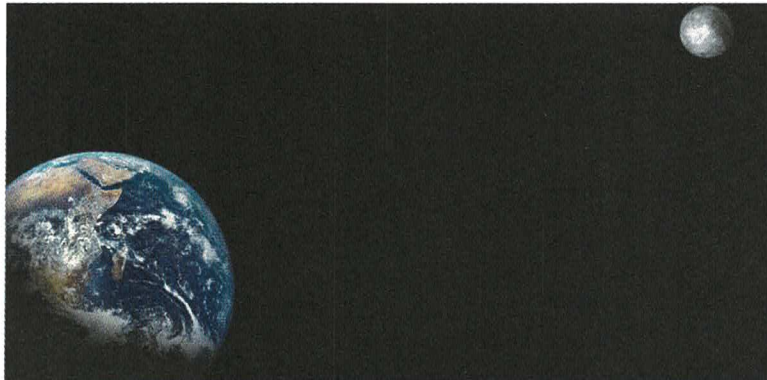
1. כוחות האינטראקציה פועלים על שני גופים שונים שקיימת ביניהם אינטראקציה. כוחות אינטראקציה הפועלים בין חלקים שונים של אותו גוף מבטלים זה את זה, ואיננו לוקחים אותם בחשבון בחישובים של אינטראקציות בין גופים.
2. כוחות האינטראקציה הפועלים בין שני גופים שווים בגודלם ומנוגדים בכיוונם.
3. למרות שכוחות האינטראקציה הפועלים בין שני גופים שונים שווים בגודלם ומנוגדים בכיוונם, הם אינם מבטלים זה את זה כי הם פועלים על שני גופים שונים.

מהחוק השלישי של ניוטון ניתן להסיק שהכוחות בטבע מופיעים בזוגות בלבד. לא קיים מצב שבו פועל כוח על גוף אחד בלי שישנו כוח נוסף, שווה לו בגודל ומנוגד בכיוון שפועל על גוף אחר, שאתו קיימת אינטראקציה.

1.5 כוחות יסוד

אם נסקור את כל המקרים שבהם קיימת אינטראקציה בין גופים הגורמת להם להימשך זה אל זה או לדחות זה את זה, נמצא שבטבע ידועים כיום ארבעה סוגים של אינטראקציה בלבד. לכן, קיימים בטבע ארבע סוגים שונים של כוחות בלבד. כוחות אלה נקראים **כוחות יסוד**. כל שאר הכוחות בהם אנו נתקלים נגזרים מכוחות היסוד. להלן ארבעת סוגי האינטראקציות הקיימים בטבע, כלומר ארבעת סוגי כוחות היסוד:

1. **הכוח הגרביטציוני**: בין כל שני גופים שיש להם מסה קיימת אינטראקציה הגורמת להם להימשך זה לזה. אינטראקציה זו מתוארת על ידי זוג של כוחות אינטראקציה שהם כוחות משיכה הפועלים על כל אחד משני הגופים. כוחות אלה נקראים **כוחות גרביטציוניים** (כוחות כבידה). הכוח הגרביטציוני הפועל על כל אחד משני הגופים פרופורציוני למסה של כל אחד מהם ופרופורציוני הפוך לריבוע המרחק בין שני הגופים. הכוח הגרביטציוני הוא חלש מאוד יחסית, ועל מנת שיהיה משמעותי, המסה של לפחות אחד משני הגופים צריכה להיות גדולה מאוד (לדוגמה, אחד הגופים צריך להיות כוכב או כוכב לכת או ירח), והמרחק בין שני הגופים צריך להיות כזה שהכוח הזה לא יהפוך לזניח. כוח זה לא מורגש בין גופים שסביבתו, שמסתם קטנה. לעומת זאת, כוח הגרביטציה הפועל בין כדור הארץ ובין הגופים הנמצאים בסביבתו מורגש. גם בין כדור הארץ והירח (איור 7) פועלים כוחות גרביטציוניים. הכוח שמפעיל כדור הארץ על הירח הוא שמחזיק את הירח במסלולו סביב כדור הארץ. גם בין כדור הארץ והשמש פועלים כוחות גרביטציוניים. הכוח הפועל על כדור הארץ במקרה זה הוא שמחזיק את כדור הארץ בתנועתו סביב השמש.



איור 7: הכוח הגרביטציוני שכדור הארץ מפעיל על הירח קובע את מסלול הירח סביב כדור הארץ.

2. **הכוח החשמלי והכוח המגנטי** (ושילובם - הכוח האלקטרומגנטי): בין כל שני גופים טעונים (במטען חשמלי) קיימת אינטראקציה המתוארת על ידי זוג של כוחות אינטראקציה הפועלים על כל אחד משני הגופים (מדובר בכוחות משיכה או דחייה וזאת בהתאם לסימני המטענים). כל אחד משני כוחות אלה נקרא **כוח חשמלי**. בנוסף, בין כל שני מגנטים קיימת אינטראקציה המתוארת על ידי זוג של כוחות אינטראקציה הפועלים על כל אחד משני המגנטים (שהם כוחות משיכה או דחייה וזאת על פי סוג הקטבים המגנטיים). כל אחד משני כוחות אלה נקרא **כוח מגנטי**. מסתבר שהמקור של הכוחות החשמליים ושל הכוחות המגנטיים הוא אחד: המטענים החשמליים, כפי שנלמד בהמשך בנושא חשמל ומגנטיות, ולכן מתייחסים לשני כוחות אלה כאל כוח אחד שנקרא **כוח אלקטרומגנטי**.
3. **הכוח החזק**: בין מרכיבי הגרעין הנקראים נוקליאונים, שהם הפרוטונים והנויטרונים, קיימת אינטראקציה קצרת טווח שגורמת לחלקיקים אלה להימשך זה לזה בעוצמה רבה כשהם נמצאים במרחק קטן מ- 3fm ($1\text{fm} = 10^{-15}\text{m}$). אינטראקציה זו בין כל שני נוקליאונים מתוארת על ידי

מכניקה ניוטונית – כרך א פרק 5: כוחות והחוק השלישי של ניוטון

זוג של כוחות אינטראקציה הפועלים על כל אחד משני החלקיקים. כל אחד משני כוחות אלה נקרא **כוח חזק**. כוח זה הוא האחראי ליציבות הגרעין ומונע ממנו להתפרק בהשפעת כוחות הדחייה החשמלית בין הפרוטונים.

4. **הכוח החלש**: זהו כוח הפועל בין חלקיקי יסוד ברמת ממדי הגרעין. לא נרחיב בנושא כוח זה כאן.

בחי יום יום לא נתקלים בכוחות החזק והחלש כי הם פועלים בעולם המיקרוסקופי. הכוחות היסודיים היחידים בהם אנו נתקלים בחיי היום-יום הם הכוחות הגרביטציוניים והכוחות האלקטרומגנטיים.

נראה בהמשך שכל סוגי הכוחות שאיתם אנחנו באים במגע בחיי יום יום (מלבד הכוח הגרביטציוני) הם, בצורה זו או אחרת, פנים אחרות של הכוח האלקטרומגנטי.

1.6 דוגמאות בחוק השלישי של ניוטון

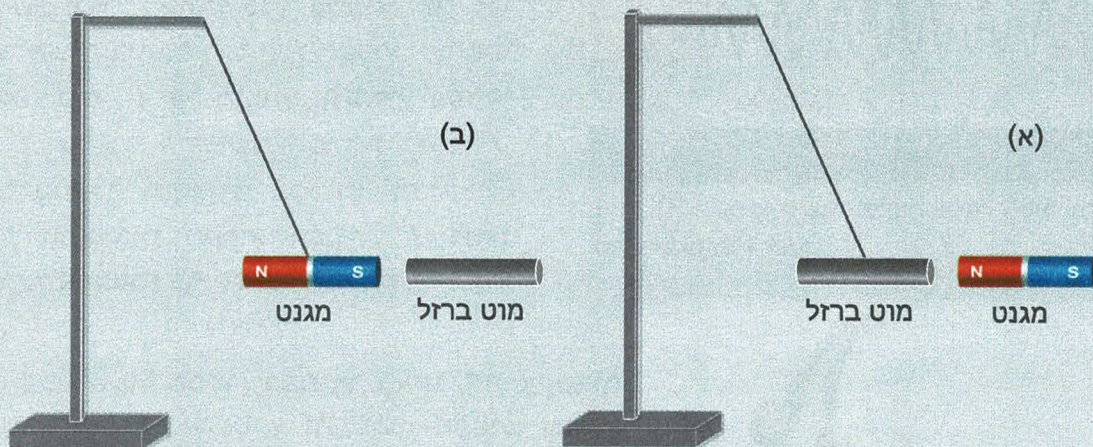
דוגמה 1

כאשר מקרבים מגנט למוט ברזל, נוצרת ביניהם אינטראקציה שבעקבותיה המגנט ומוט הברזל נמשכים זה לזה. אינטראקציה זו מתוארת על ידי זוג כוחות הפועלים על מוט הברזל ועל המגנט, שהם כוחות אינטראקציה השווים בגודלם ומנוגדים בכיוונם.

ישנה תפיסה מוטעית על פיה רק המגנט הוא זה שמפעיל כוח על מוט הברזל. אלא שזה אינו המצב. האינטראקציה בין המגנט למוט הברזל היא הדדית וסימטרית. כל אחד משני גופים אלה מפעיל כוח על האחר. הניסוי הבא מבהיר עניין זה:

אם נקשור את מוט הברזל באמצעות חוט לנקודה קבועה, ונקרב את המגנט למוט הברזל כפי שמתואר באיור 8א נמצא שמוט הברזל נמשך למגנט (כלומר פועל עליו כוח). אם נחליף בין המגנט ומוט הברזל ונקרב את מוט הברזל למגנט כפי שמתואר באיור 8ב נמצא שהמגנט נמשך למוט הברזל (כלומר פועל גם על המגנט כוח).

כלומר המגנט ומוט הברזל מפעילים זה על זה כוחות. כוחות אלה הם כוחות אינטראקציה השווים בגודלם ומנוגדים בכיוונם.



איור 8: (א) המגנט נראה מושך את מוט הברזל. (ב) מוט הברזל נראה מושך את המגנט.

דוגמה 2

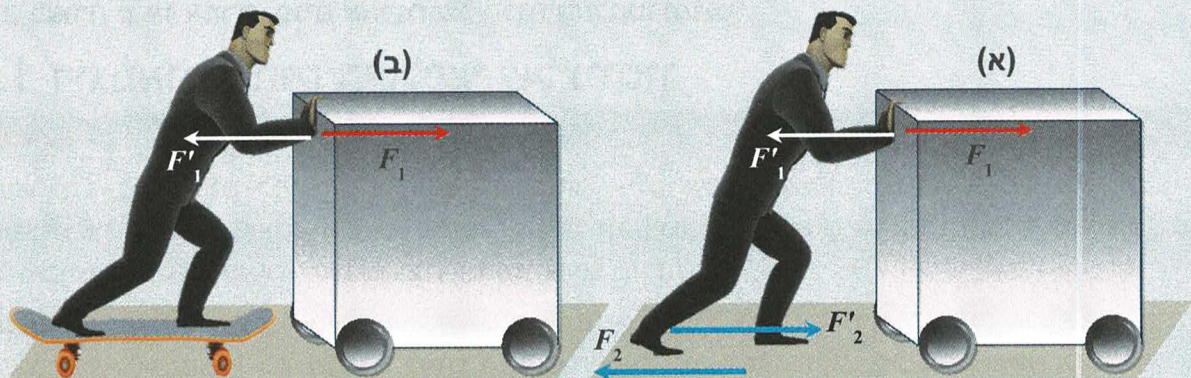
כאשר אדם דוחף גוף כפי שמתואר באיור 9א, קיימת אינטראקציה בין ידיו של האדם והגוף. אינטראקציה זו מתוארת על ידי כוחות אינטראקציה שהם הכוח F_1 שכפות הידיים (האדם) מפעילות על הגוף, והכוח F'_1 שהגוף מפעיל על כפות הידיים (האדם) - ראה איור 9א. שני הכוחות

מכניקה ניוטונית – כרך א פרק 5: כוחות והחוק השלישי של ניוטון

F_1 ו- F'_1 שווים בגודלם ומנוגדים בכיוונם.

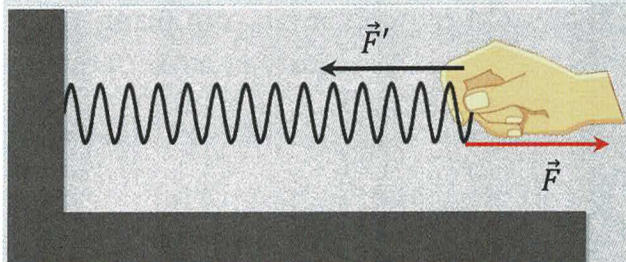
כתוצאה מפעולת הכוח F_1 הגוף נדחף לכיוון ימין, וכתוצאה מפעולת הכוח F'_1 האדם אמור להידחף שמאלה, אבל בגלל כוחות החיכוך בין רגלי האדם ובין הרצפה, האדם נאחז ברצפה ורק הגוף הוא שנע הצידה. במצב זה האדם מפעיל על הרצפה, באמצעות רגליו, כוח F_2 בכיוון אחורה, וכתגובה הרצפה מפעילה על רגלי האדם (על האדם) כוח F'_2 בכיוון קדימה (ראה איור 9א). כוח זה הוא שמאזן את הכוח F_1 שפועל על האדם בכיוון הנגדי, ולכן האדם נשאר במנוחה.

לעומת זאת, אם אין כוח חיכוך בין רגלי האדם והרצפה, כמתואר באיור 9ב, גם האדם וגם הגוף נהדפים לכיוונים הפוכים בהשפעת כוחות האינטראקציה F_1 ו- F'_1 .



איור 9: (א) בין כפות ידי האדם והגוף פועלים כוחות אינטראקציה. הכוח הפועל על הגוף גורם לתנועתו. האדם נשאר במנוחה בגלל כוחות האינטראקציה בין רגליו לרצפה. (ב) אם אין כוחות אינטראקציה בין רגלי האדם לרצפה, האדם נע אחורה בהשפעת הכוח הפועל עליו.

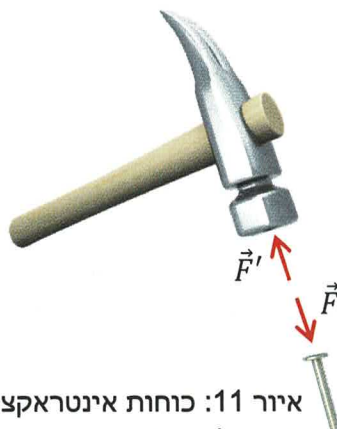
דוגמה 3



איור 10: קפיץ קשור בקצה אחד לקיר ותלמיד מושך בקצהו האחר.

תלמיד קושר קצה קפיץ לקיר, אוחז בקצה האחר שלו ומושך אותו כך שהקפיץ מתארך כפי שמתואר באיור 10. במקרה זה יש אינטראקציה בין כף היד ובין הקפיץ, כף היד מפעילה כוח $\vec{F}$ על הקפיץ, והקפיץ מפעיל כוח $\vec{F}'$ על כף היד. שני הכוחות $\vec{F}$ ו- $\vec{F}'$ שווים בגודלם ומנוגדים בכיוונם. הכוח $\vec{F}$ גורם להתארכות הקפיץ והכוח $\vec{F}'$ גורם ללחץ על אצבעות כף ידו של התלמיד.

דוגמה 4



איור 11: כוחות אינטראקציה בין פטיש למסמר.

מכים בפטיש על מסמר, כמתואר באיור 11. בעקבות האינטראקציה בין הפטיש והמסמר, הפטיש מפעיל כוח $\vec{F}$ על המסמר, והמסמר מפעיל כוח $\vec{F}'$ על הפטיש. כתוצאה מהכוח $\vec{F}$ המסמר נהדף קדימה בחוזקה, וכתוצאה מהכוח $\vec{F}'$ הפטיש נהדף אחורה. למרות שהכוחות $\vec{F}$ ו- $\vec{F}'$ שווים בגודלם, השפעת הכוח $\vec{F}$ על המסמר גדולה יותר מהשפעתו של $\vec{F}'$ על הפטיש משום שמסת המסמר קטנה בהרבה ממסת הפטיש.

2. יחידות הכוח

יחידת הכוח בשיטת היחידות SI היא ניוטון, על שמו של פילוסוף הטבע אייזק ניוטון (Isaac Newton 1642–1726). יחידה זו מסומנת באות N. הגדרת יחידת הניוטון מבוססת על החוק השני של ניוטון, נושא אותו נלמד בהמשך, בפרק 7. בשלב זה נביא הגדרה דידקטית של היחידה ניוטון באופן הבא:

אם נחזיק בכף היד משקולות שונות, נמצא שלכל אחת מהן יש משקל שונה. כלומר כל אחת תפעיל כוח שונה על כף היד שלנו וזאת כתוצאה מכוח הכובד (הכבידה) שפועל עליהן. אם נחזיק משקולת שמסתה $102\text{ g} = 0.102\text{ kg}$, הכוח שתפעיל משקולת זו על כף היד שלנו שווה לניוטון אחד. כלומר:

יחידת הכוח ניוטון היא גודלו של כוח הכבידה הפועל בקרבת פני כדור הארץ על משקולת שמסתה 102 g .

לשם פשטות משתמשים בקירוב שניוטון אחד שווה לכוח הכבידה הפועל בקרבת פני כדור הארץ על משקולת שמסתה 100 g .

על פי קירוב זה כוח הכבידה שמפעיל כדור הארץ על מסה שגודלה 1 kg (1,000 g) הוא 10 N .

שאלה

- חשב את כוח הכבידה שפועל על פני כדור הארץ על גוף שמסתו: (1) 200 g (2) 2 kg .
- נתון שכוח הכבידה הפועל על גוף על פני כדור הארץ הוא 300 N . מצא את מסת הגוף.

3. כוחות מכניים אחדים

נסקור בסעיף זה מספר כוחות מכניים המאפשרים לנו לעסוק בפתרון בעיות במכניקה.

3.1 כוח הכבידה (הכוח הגרביטציוני)

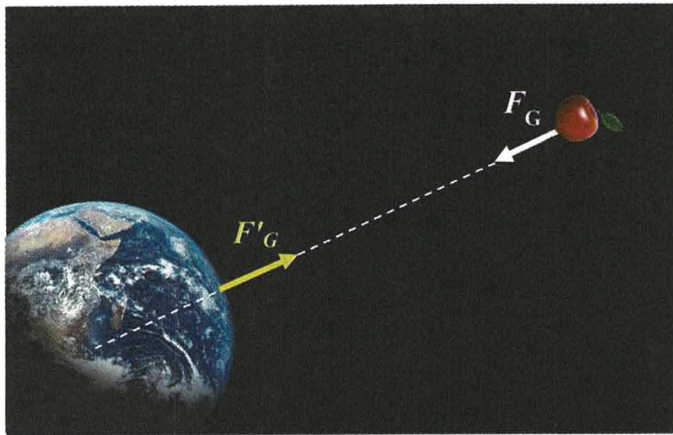
כאמור, בין כל שני גופים שיש להם מסה קיימת אינטראקציה הגורמת להם להימשך זה לזה. אינטראקציה זו מתוארת על ידי זוג של כוחות אינטראקציה שהם כוחות משיכה הפועלים על כל אחד משני הגופים. כוחות אלה נקראים **כוחות כבידה** או **כוחות גרביטציוניים**, ומסומנים ב- F_G מהלועזית Gravitational Force. הכוח הגרביטציוני הפועל על כל אחד משני הגופים פרופורציוני למסה של כל אחד מהם ופרופורציוני הפוך לריבוע המרחק בין שני הגופים. הכוח הגרביטציוני הוא חלש מאוד, ועל מנת שיהיה משמעותי, המסה של לפחות אחד משני הגופים צריכה להיות גדולה מאוד (לדוגמה, אחד הגופים צריך להיות כוכב או כוכב לכת או ירח), והמרחק בין שני הגופים צריך להיות כזה שהכוח הזה לא יהפוך לזניח.

על פי האמור לעיל, בין כוכבי הלכת השונים לבין הגופים שבקרבתם פועלים כוחות גרביטציוניים, שהם כוחות אינטראקציה שכל זוג מהם שווים בגודלם ומנוגדים בכיוונם. הכוכב מפעיל על הגוף כוח גרביטציוני F_G והגוף, על פי החוק השלישי של ניוטון, מפעיל על כוכב הלכת כוח F'_G השווה בגודלו ומנוגד בכיוונו לכוח F_G . מכיוון שבדרך כלל מסת כוכב הלכת גדולה מאוד ביחס למסת הגוף, השפעת הכוח F'_G שהגוף מפעיל על כוכב הלכת היא זניחה. לכן ברוב הבעיות בהם דנים אנו מתעניינים רק בהשפעת הכוח F_G שכוכב הלכת מפעיל על הגוף.

גם בסביבת כדור הארץ פועלים כוחות הכבידה בין הגופים לבין כדור הארץ. כדור הארץ מפעיל על הגוף כוח F_G , והגוף מפעיל על כדור הארץ כוח F'_G השווה בגודלו לכוח F_G ומנוגד לו בכיוון (ראה איור 12). בגלל שמסת כדור הארץ גדולה מאוד ביחס לגופים הנמצאים בסביבתו הקרובה, הוא כמעט ואינו מושפע מפעולת הכוח F'_G שגופים אלה מפעילים עליו. כתוצאה מכך, כאשר משחררים גוף בסביבת כדור הארץ, הגוף הוא שנע לכיוון כדור הארץ, בעוד שכדור הארץ נשאר למעשה במנוחה.

מכניקה ניוטונית – כרך א פרק 5: כוחות והחוק השלישי של ניוטון

כוח הכבידה (הגרביטציה) שכדור הארץ מפעיל על גוף הנמצא בסביבתו תלוי במסת הגוף, במסת



איור 12: בין כדור הארץ לגופים סביבו פועלים כוחות אינטראקציה שהם כוחות גרביטציוניים.

כדור הארץ ובמרחק בין הגוף לבין מרכז כדור הארץ. מכיוון שמסת כדור הארץ היא גודל קבוע, ועל פני כדור הארץ המרחק ממרכז כדור הארץ קבוע בקירוב טוב מאוד (זהו למעשה רדיוס כדור הארץ), נקבל שעל פני כדור הארץ כוח הכבידה הפועל על גוף מסוים תלוי במסת הגוף בלבד.

נלמד בהמשך כיצד לחשב את כוח הגרביטציה (כבידה) שפועל על גוף שמסתו m הנמצא על פני כדור הארץ, וזאת על סמך החוק השני של ניוטון. בשלב זה נסתמך על הגדרת יחידת הכוח "ניוטון" לחישוב כוח זה.

על פי ההגדרה, יחידת הכוח ניוטון היא כוח הכבידה שפועל על פני כדור הארץ על גוף שמסתו 100 g (במדויק). מכיוון שקילוגרם מכיל 10 יחידות של 100 g , נקבל שכוח הכבידה שפועל על קילוגרם אחד הוא 10 ניוטונים כלומר (10 N/kg) . לכן אם נתון גוף שמסתו m קילוגרמים, כוח

הכבידה שיפעל עליו על פני כדור הארץ נתון על ידי הקשר:

$$(1) \quad F_G = \left(10 \frac{\text{N}}{\text{kg}}\right) \cdot m$$

נהוג לקרוא לכוח הכבידה שפועל על הגופים על פני כדור הארץ (או כוכב לכת אחר) בשם כוח הכובד במקום כוח הכבידה.

דוגמאות

דוגמה 1

נתון גוף שמסתו 6 kg . חשב את כוח הכובד שפועל על גוף זה:

- על פני כדור הארץ.
- על פני הירח. נתון שכוח הכובד על פני הירח קטן פי 6 מכוח הכובד על פני כדור הארץ.
- על פני השמש. נתון שכוח הכובד על פני השמש גדול פי 27.5 מכוח הכובד על פני כדור הארץ.

פתרון:

א. כוח הכובד שפועל על הגוף על פני כדור הארץ הוא:

$$F_G = \left(10 \frac{\text{N}}{\text{kg}}\right) m = \left(10 \frac{\text{N}}{\text{kg}}\right) (6\text{ kg}) = 60\text{ N}$$

ב. מכיוון שכוח הכובד על פני הירח קטן פי 6 מכוח הכובד על פני כדור הארץ, נקבל שכוח הכובד שפועל על הגוף הנתון על פני הירח הוא:

$$F_G = \frac{1}{6} \times 60\text{ N} = 10\text{ N}$$

ג. כוח הכובד שפועל על הגוף על פני השמש

$$\text{הוא: } F_G = 27.5 \times 60\text{ N} = 1650\text{ N}$$

דוגמה 2

אדם יכול לשאת על פני כדור הארץ מסה מקסימלית של 75 kg . חשב את המסה המקסימלית שיכול אדם זה לשאת על פני הירח.

פתרון:

כוח הכובד שפועל על גוף שמסתו m על פני הירח קטן פי 6 מכוח הכובד שפועל עליו על פני כדור הארץ.

אם נסמן את כדור הארץ ב-1 ואת הירח ב-2, נקבל שכוח הכובד שפועל על גוף שמסתו m על פני הירח נתון על ידי:

$$F_{G2} = \frac{1}{6}(10m)$$

נסמן את המסה המקסימלית שהאדם יכול לשאת על הירח ב- $m_{2\text{max}}$ ואת זו על כדור הארץ $m_{1\text{max}}$. צריך להתקיים:

$$\frac{1}{6}(10m_{2\text{max}}) = 10m_{1\text{max}} = 10(75)$$

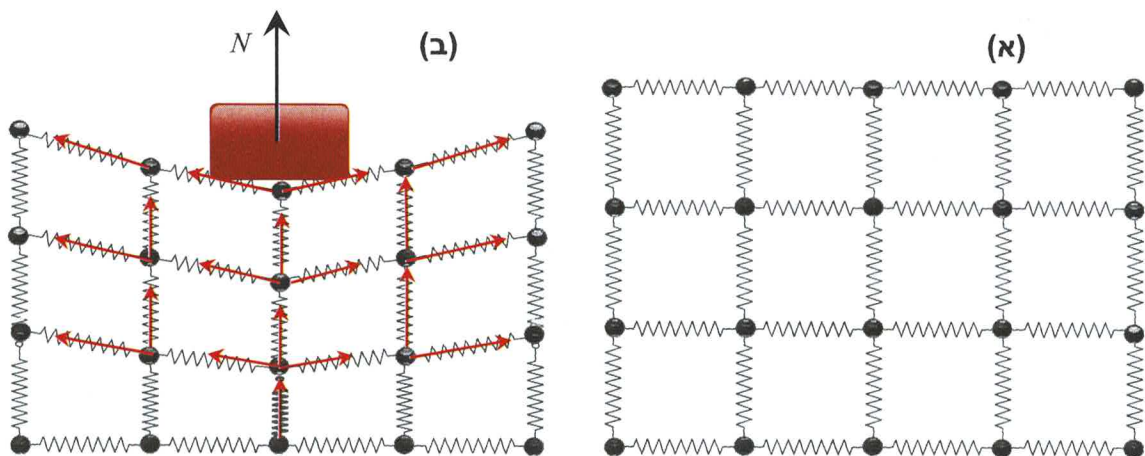
$$\Rightarrow m_{2\text{max}} = 450\text{ kg}$$

3.2. הכוח הנורמלי

כאשר משחררים גוף מגובה מסוים מעל הקרקע הוא נופל בגלל השפעת כוח הכובד שפועל עליו. אם נניח גוף זה על פני שולחן (או על פני משטח כלשהו), הגוף יישאר במנוחה, למרות שכוח הכובד ממשיך לפעול עליו. המשמעות היא שבמקרה זה פועל על הגוף כוח המבטל את כוח הכובד, כלומר כוח השווה בגודלו ומנוגד בכיוונו לכוח הכובד. מהו כוח זה, מהו מקורו ומן תכונותיו?

מקור כוח זה הוא המשטח שעליו מונח הגוף, וברמה מיקרוסקופית, מקור כוח זה הוא הכוחות הפועלים בין חלקיקי החומר. באיור 13א מוצג חלק של המשטח, לפני שמניחים עליו את הגוף, ומתוארים חלקיקי החומר הקשורים ביניהם על ידי כוחות. לכל חומר יש תכונה שנקראת אלסטיות, שהיא הנטייה של החומר לחזור לצורתו הקודמת אם משנים את המרחק בין חלקיקיו. באיור 13 הקשרים בין חלקיקי החומר מיוצגים על ידי קפיצים קטנים, המדמים את תכונת האלסטיות של החומר. כמובן שתכונת האלסטיות שונה מחומר לחומר. יש חומרים שהם יותר אלסטיים ויש חומרים שמידת האלסטיות שלהם פחותה.

כאשר מניחים גוף על המשטח, כפי שמתואר באיור 13ב, הגוף, בגלל כוח הכובד הפועל עליו, מפעיל כוח על המשטח. כוח זה גורם לחלק מחלקיקי המשטח להתקרב זה לזה, ולחלק אחר להתרחק זה מזה (ראה איור 13ב), במילים אחרות כוח זה גורם לשינוי צורת המשטח (שינוי זה הוא לפעמים שינוי ברמה מיקרוסקופית ואינו נראה לעין, ולעתים הוא בולט ונראה לעין). כתוצאה מהאלסטיות של החומר, פועלים על חלקיקי החומר כוחות המנסים להחזיר את המרחקים ביניהם למצב ההתחלתי (כלומר להחזיר את המשטח לצורתו המקורית). כתוצאה מתהליך זה, המשטח מפעיל כוח על הגוף המונח עליו. כוח זה מקזז, ולמעשה מבטל את השפעת כוח הכובד. לכן מקור הכוח שהמשטח מפעיל על הגוף המונח עליו הוא המשטח עצמו, וזאת בשל תכונת האלסטיות של החומר.

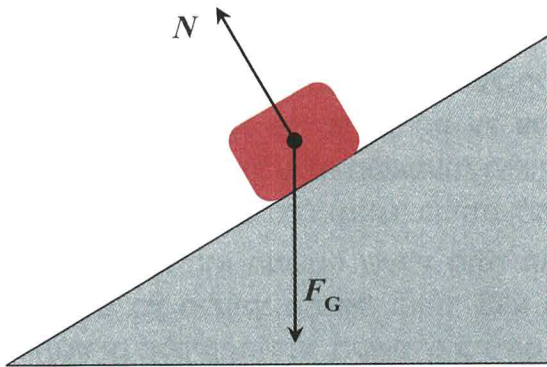


איור 13: (א) בין חלקיקי החומר קיימים "קשרים" השומרים על מבנה החומר. (ב) כאשר מניחים גוף על משטח מסוים, שינוי המרחקים בין חלקיקי החומר גורם להפעלת כוח שקול על הגוף בכיוון ניצב לפני המשטח. כוח זה נקרא הכוח הנורמלי.

תכונות הכוח שהמשטח מפעיל על הגוף:

1. כאשר מניחים גוף על משטח כלשהו, המרחקים בין חלקיקי החומר משתנים. עקב האלסטיות של החומר פועלים כוחות על חלקיקים אלה, אשר מסתכמים לכוח שקול הפועל בסופו של דבר על הגוף המונח על המשטח. מתברר שהכוחות הפועלים בין חלקיקי החומר הם סימטריים ביחס לניצב למשטח (ראה איור 13ב), לכן השקול שלהם, הפועל על הגוף המונח על המשטח, מכון תמיד בכיוון הניצב למשטח. בגלל תכונה זו, הכוח שהמשטח מפעיל בגלל האלסטיות שלו על הגוף המונח עליו נקרא **כוח נורמלי** (או נורמל) ומסומן באות N , מהלועזית

Normal Force שפרושה כוח ניצב.

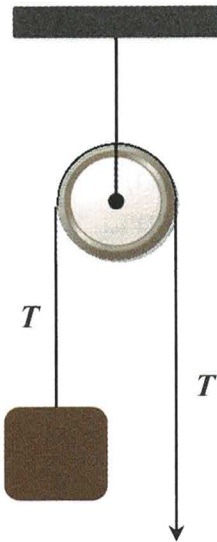


איור 14: הכוח הנורמלי תמיד ניצב למשטח עליו מונח הגוף.

2. הכוח הנורמלי תמיד ניצב למשטח עליו מונח הגוף, אפילו אם המשטח איננו אופקי אלא נטוי (כפי שמתואר באיור 14).

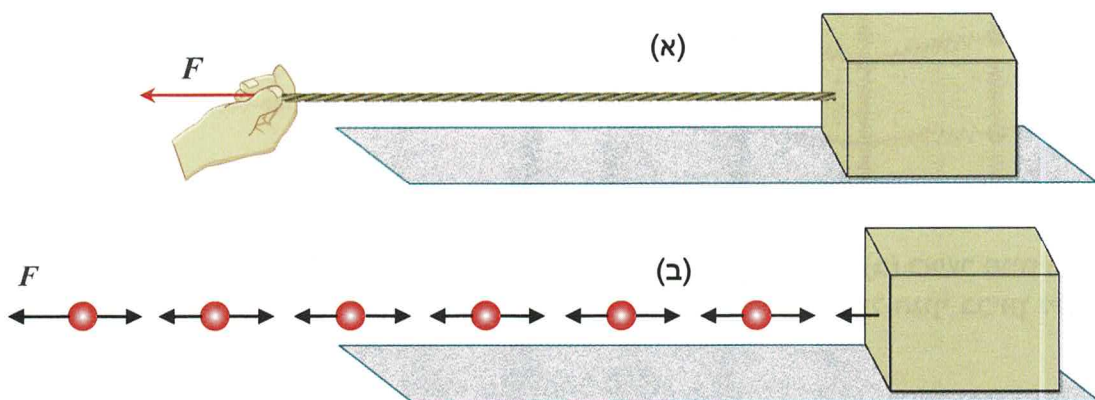
3. הכוח הנורמלי N פועל על הגוף המונח על המשטח ולא על המשטח עצמו. לכן הכוחות הפועלים על הגוף המתואר באיור 13 ב ו-14 הם כוח הכובד F_G והכוח הנורמלי N .

3.3. המתיחות



איור 15: החבל משמש לשינוי כיוון הכוח באמצעות שימוש בגלגלת.

חוטים או חבלים משמשים, בין השאר, לתליית גופים או למשיכת גופים על משטחים וגם לשינוי כיוון הכוח המופעל על הגוף באמצעות שימוש בגלגלת (כפי שמתואר באיור 15). כאשר קושרים קצה חוט לגוף המונח על משטח ומושכים בקצהו האחר (כפי שמתואר באיור 16א), החבל נמתח במקרה זה, המרחקים בין חלקיקי החומר ממנו עשוי החבל גדלים (ברמה המיקרוסקופית) כפי שמתואר באיור 16ב. כתוצאה מהאלסטיות של החומר, כל חלקיק מפעיל על החלקיקים שאחריו כוח. כוח זה הוא המקור למתיחות בחבל. סכום כל הכוחות הפועלים בין חלקיקי החומר לרוחב החבל מסתכמים לכוח שקול המכוון בכיוון החבל, ונקרא **המתיחות בחבל**. כוח זה מסומן באות T מהמילה הלועזית Tension שפרושה מתיחות.



איור 16: (א) חבל קשור לגוף ומושכים בקצהו החופשי. (ב) המתיחות פועלת בין חלקיקי החבל.

הערות:

1. על פי החוק השלישי של ניוטון, בין כל שני אלמנטים (חלקים) של החבל פועלים כוחות השווים בגודלם ומנוגדים בכיוונם כפי שמתואר באיור 16ב. בדרך זו כל אלמנט מפעיל כוח על האלמנט שבא אחריו עד שמגיעים לגוף. האלמנט האחרון בחבל מפעיל על הגוף כוח T בכיוון שמאל

מכניקה ניוטונית – כרך א פרק 5: כוחות והחוק השלישי של ניוטון

- (במקרה המתואר באיור 16ב), והגוף, על פי החוק השלישי של ניוטון, מפעיל על אלמנט זה (על קצה החבל) כוח T' השווה בגודלו ל- T ומנוגד לו בכיוון (בכיוון ימין באיור 16ב).
2. על פי ההסבר בהערה הקודמת ניתן להסיק שעל מנת שהחבל יהיה מתוח (על מנת שיפעל לאורכו הכוח T), צריך שיפעלו על שני קצותיו כוחות מנוגדים, כפי שמתואר באיור 17, אחרת הוא יהיה רפוי.



איור 17: על מנת שהחבל יהיה מתוח צריכים לפעול על קצותיו כוחות מנוגדים.

3. כיוון המתיחות הוא תמיד לאורך החבל.
4. בפרק 7 נוכיח שהמתיחות בחבל מקיימת את התכונות הבאות:
- אם מסת החבל זניחה, המתיחות בחבל בכל חלקיו זהה, ללא קשר למצב המערכת, כלומר אם היא נמצאת במנוחה, בתנועה במהירות קבועה או בתאוצה.
 - אם מסת החבל אינה זניחה והמערכת נמצאת בשווי משקל, שוב המתיחות בחבל אחידה; לעומת זאת, אם המערכת נמצאת בתאוצה, המתיחות בחבל קטנה ככל שמתרחקים מקצה החבל שעליו פועל הכוח החיצוני.

3.4. כוח הקפיץ

ישנם סוגים שונים של קפיצים, שהנפוץ ביניהם הוא הקפיץ הסלילי (לולייני) המיוצר מליפוף תיל אלסטי סביב גליל, (ראה איור 18).



איור 18: קפיץ סלילי או לולייני

קפיץ זה מתאפיין בכך שאם קושרים קצה אחד שלו לנקודה קבועה, אוחזים בידנו בקצה האחר שלו (כפי שמתואר באיור 19א) ומפעילים עליו כוח המקביל לציר האורך שלו בכיוון החוצה, הקפיץ מתארך (איור 19ב). אם מפעילים על הקפיץ כוח לאורכו בכיוון פנימה, הקפיץ מתכווץ (איור 19ג). בשני המקרים (כאשר הקפיץ מתארך או מתכווץ) הוא מפעיל כוח על היד שלנו. כוח זה שהקפיץ מפעיל כשהוא מתארך או מתכווץ, נקרא כוח הקפיץ ומסומן ב- F_{sp} (מהלועזית Spring Force).

כוח זה מתאפיין בתכונות הבאות:

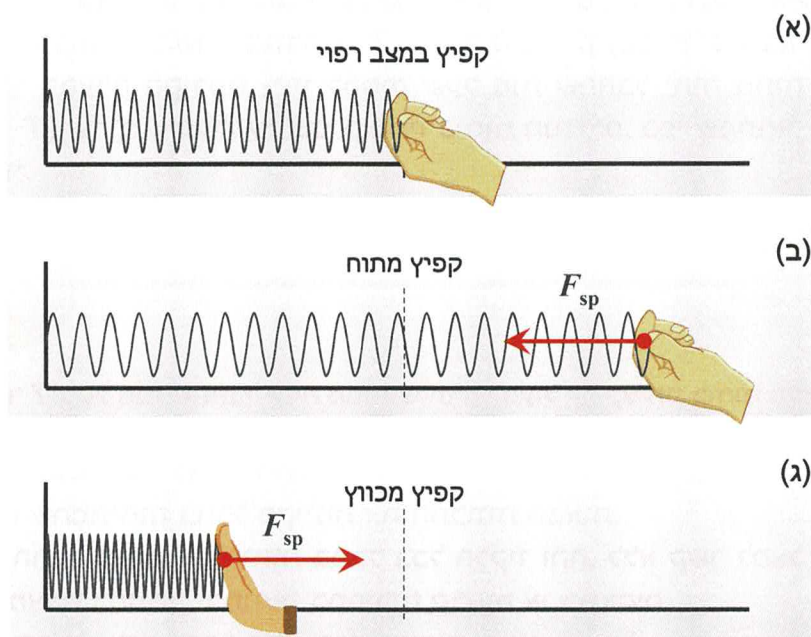
- הוא מכון בכיוון מנוגד לשינוי באורך הקפיץ (ראה איור 19).
- הוא סימטרי בהתארכות או בהתכווצות הקפיץ, כלומר גודל הכוח שהקפיץ מפעיל זהה אם הקפיץ מתארך או מתכווץ באותו גודל, אבל הכיוון שלו שונה.
- הוא נמצא ביחס ישר לשינוי $\Delta \ell$ באורך הקפיץ, כך שמתקיים:

$$(2) \quad F_{sp} = k \Delta \ell$$

כאשר k הוא קבוע הפרופורציה, ונקרא **קבוע הקפיץ**.

נענה על השאלות הבאות:

- מהן היחידות של קבוע הקפיץ, k ?
- איך ניתן למדוד אותו?
- מהי המשמעות הפיזיקלית שלו?



איור 19: הכוח הפועל על כף היד כאשר (א) קפיץ רפוי. (ב) קפיץ מתוח. (ג) קפיץ מכווץ.

התשובה לשאלה 1: על פי הקשר (2) נקבל:

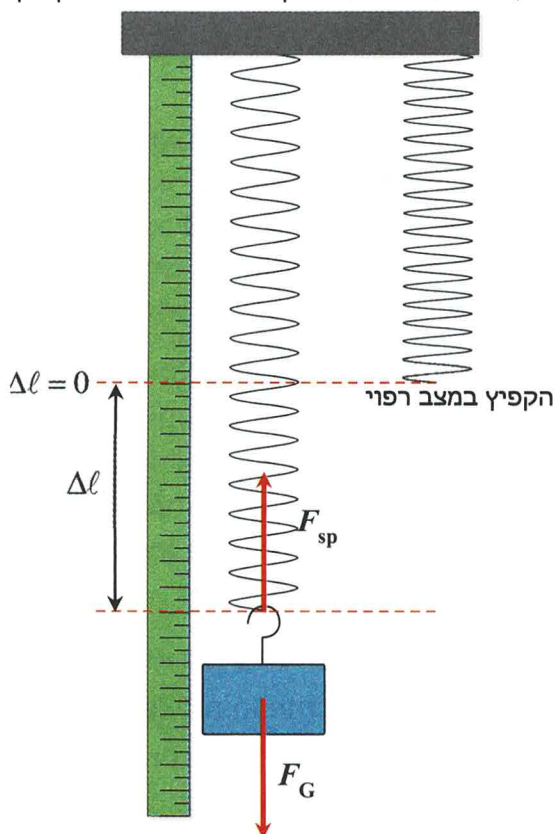
$$[k] = \frac{[F]}{[\Delta \ell]} = \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad (3)$$

התשובה לשאלה 2: מדידת הקבוע k מתבצעת באמצעות הניסוי הבא:

קושרים קצה אחד של הקפיץ בנקודה קבועה על סטנד, ומפעילים על הקצה האחר של הקפיץ כוחות שונים וזאת על ידי תליית משקולות שונות על וו המחובר לקפיץ (ראה איור 20). בגלל כוח הכובד F_G שפועל על המשקולת, הקפיץ מתארך עד למצב שבו כוח הקפיץ שפועל על המשקולת כלפי מעלה, F_{sp} , מתאזן עם כוח הכובד F_G . במצב זה מתקיים ש- $F_{sp} = F_G$. רושמים את התארכות הקפיץ $\Delta \ell$ ואת כוח הקפיץ F_{sp} . חוזרים על הניסוי מספר פעמים כך שבכל פעם מודדים את התארכות הקפיץ $\Delta \ell$ כפונקציה של F_{sp} , השווה ל- F_G . הטבלה הבאה מראה את התוצאות שהתקבלו בניסוי מסוג זה:

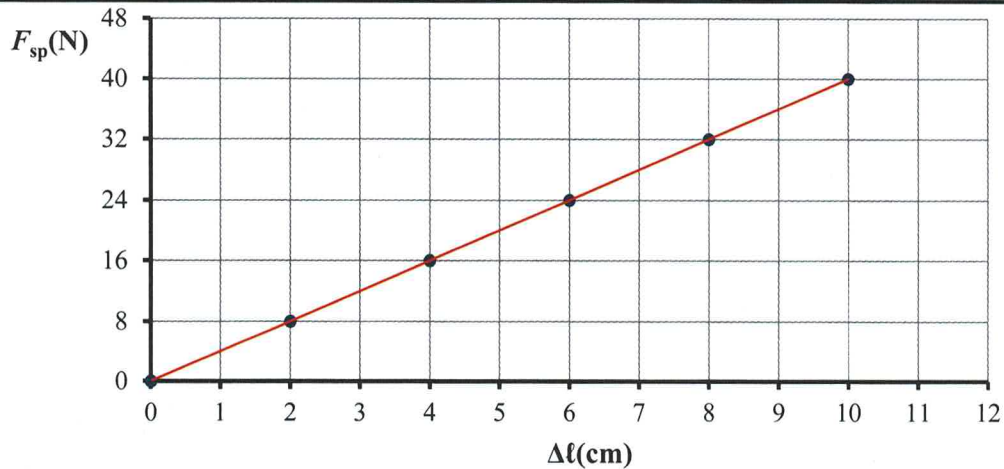
$\Delta \ell (\text{cm})$	0	2	4	6	8	10
$F_{sp} (\text{N})$	0	8	16	24	32	40

אם נשרטט את גודל כוח הקפיץ F_{sp} כפונקציה של התארכות הקפיץ $\Delta \ell$ נקבל את הגרף המתואר באיור 21.



איור 20: מערכת למדידת קבוע הקפיץ.

מכניקה ניוטונית – כרך א פרק 5: כוחות והחוק השלישי של ניוטון



איור 21: הכוח שהקפיץ מפעיל כפונקציה של התארכותו.

על פי הקשר (2), שיפוע הגרף המוצג באיור 21 מייצג את קבוע הקפיץ. אם נחשב את שיפוע הגרף במקרה זה נקבל: $k = 4 \text{ N/cm}$.

התשובה לשאלה 3: ניעזר בתוצאה שהתקבלה בניסוי המתואר למעלה על מנת להבין מהי המשמעות הפיזיקלית של הקבוע k . על פי תוצאות ניסוי זה התקבל שקבוע הקפיץ הוא $k = 4 \text{ N/cm}$. משמעות גודל זה היא שהכוח שהקפיץ מפעיל משתנה (גדל או קטן) ב-4 N כאשר אורך הקפיץ משתנה (גדל או קטן) בסנטימטר אחד. מכאן נקבל שלקבוע הקפיץ יש את המשמעות הבאה:

קבוע הקפיץ מבטא את השינוי בכוח שהקפיץ מפעיל בעקבות שינוי אורכו ביחידת אורך אחת.

מכיוון שהכוח שהקפיץ מפעיל שווה, על פי החוק השלישי של ניוטון, לכוח החיצוני המופעל על הקפיץ, נקבל שלקבוע הקפיץ יש את המשמעות הבאה גם כן:

קבוע הקפיץ מבטא את גודל השינוי בכוח החיצוני המופעל על הקפיץ הנדרש על מנת לשנות את אורך הקפיץ ביחידת אורך אחת.

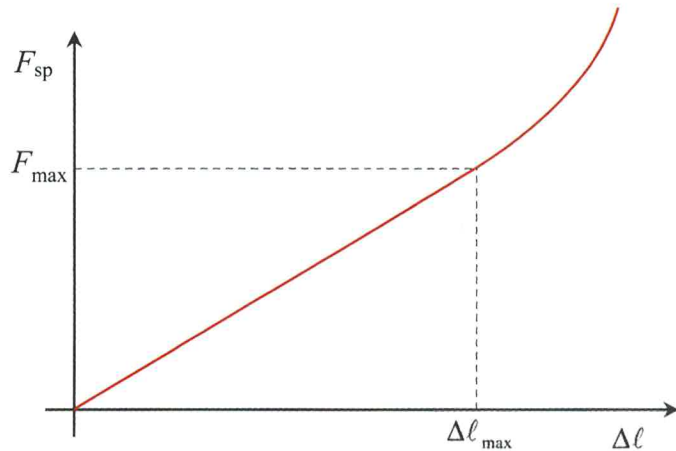
הערות:

1. קבוע הקפיץ הוא גודל קבוע עבור קפיץ נתון, אבל משתנה מקפיץ לקפיץ.
2. קבוע הקפיץ תלוי באלסטיות של הקפיץ, התלויה בסוג החומר ממנו עשוי הקפיץ ובנתונים הגאומטריים של הקפיץ, שהם: מספר הליפופים שלו, עובי התיל ממנו עשוי הקפיץ ורדיוס הקפיץ.
3. מאחר וכוח הקפיץ F_{sp} מכוון נגד השינוי באורך הקפיץ Δl , כוח זה, כולל הסימן, נתון על ידי הקשר הבא:

$$(4) \quad F_{sp} = -k\Delta l$$

4. הקשר בין כוח הקפיץ והתארכותו הוא לינארי עד מידת התארכות מקסימלית מסוימת (Δl_{max}) שלאחר ממנה הקפיץ מאבד את האלסטיות שלו, והקשר בין כוח הקפיץ והתארכותו מפסיק להיות לינארי, כפי שמתואר בחלק השני בגרף המוצג באיור 22.
- לאחר שהקפיץ מאבד את האלסטיות שלו נצטרך להפעיל עליו יותר כוח על מנת לגרום לו להתארך באותה מידה.

5. הקשר (4), המתאר את כוח הקפיץ כפונקציה של התארכותו (או התכווצותו), נקרא **חוק הוק** על שמו של רוברט הוק (1635–1703), אחד מפילוסופי הטבע שחקר נושא זה ואשר הגיע לחוק זה.



איור 22: לאחר שהקפיץ מאבד את האלסטיות שלו, הקשר בין כוח הקפיץ והתארכותו מפסיק להיות קשר ישר.

דוגמה

מפעילים כוח שגודלו 20 N על קפיץ מסוים. כתוצאה מכך הקפיץ מתארך ב-10 cm.
 א. חשב את קבוע הקפיץ.
 ב. חשב את התארכות הקפיץ כאשר מפעילים עליו כוח של 50 N. הנח שהקפיץ אינו חורג מהתחום האלסטי.
 ג. מפעילים על הקפיץ כוח שהוא מתארך ב-8 cm. חשב כוח זה.
 ד. חשב את הכוח שהקפיץ מפעיל במצב המתואר בסעיף הקודם.

פתרון:

א. $k = \frac{F}{\Delta \ell} = \frac{20 \text{ N}}{10 \text{ cm}} = 2 \text{ N/cm} = 200 \text{ N/m}$
 ב. $\Delta \ell = \frac{F}{k} = \frac{50 \text{ N}}{2 \text{ N/cm}} = 25 \text{ cm}$
 ג. $F = k \Delta \ell = (2 \frac{\text{N}}{\text{cm}})(8 \text{ cm}) = 16 \text{ N}$
 ד. על פי החוק השלישי של ניוטון, הקפיץ מפעיל כוח השווה בגודלו והמנוגד בכיוונו לכוח המופעל עליו, כלומר 16 N בכיוון הנגדי.

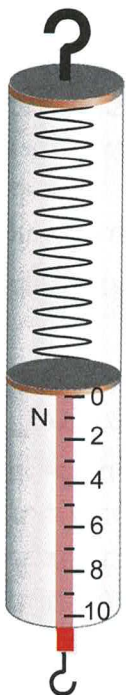
4. הדינמומטר

קפיץ עשוי לשמש גם כמכשיר למדידת כוח. במקרה זה הוא נקרא **דינמומטר**. על מנת למדוד את גודלו של כוח מסוים F , יש לקחת קפיץ שהקבוע שלו k ידוע, לקשור קצה אחד שלו לנקודה קבועה ועל הקצה האחר להפעיל את הכוח F . מודדים את התארכות הקפיץ $\Delta \ell$ ביחס למצב הרפוי שלו. הכוח F נתון על ידי חוק הוק:

$$(5) \quad F = k \Delta \ell$$

על מנת שתהליך המדידה יהיה פשוט ומהיר יותר וללא צורך בחישוב, הדינמומטר בנוי בצורה המאפשרת זאת. הקפיץ מוכנס לגליל (שקוף בדרך כלל) כפי שמתואר באיור 23, כך שקצה אחד שלו קשור לחלק הפנימי של הגליל, ולקצה האחר קשור מוט דק המסתיים בו. על הגוף החיצוני של הגליל השקוף יש סקלת כוח המכוילת על פי קבוע הקפיץ. לדוגמה, אם קבוע הקפיץ הוא 2 N/cm , אז הסקלה תכויל כך שכל סנטימטר מייצג כוח שגודלו 2 N. החל מ-0 בנקודה שבה הקפוץ רפוי (ראה איור 23).

כאשר מפעילים כוח לא ידוע על הווי שבסוף המוט, הקפיץ מתארך. קריאת הכוח בנקודה אליה מגיע קצה הקפיץ לאחר הפעלת הכוח שווה לכוח המופעל על הדינמומטר.



איור 23: הדינמומטר

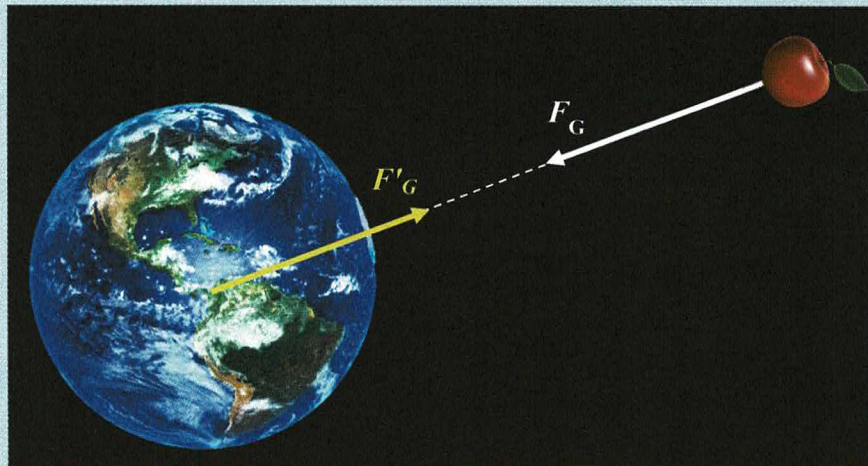
5. ניתוח בעיות בחוק השלישי של ניוטון

בעיה 1

גוף נופל נפילה חופשית על פני כדור הארץ. קבע מהו הכוח הפועל על הגוף, מי מפעיל כוח זה ומהו כוח התגובה לכוח זה.

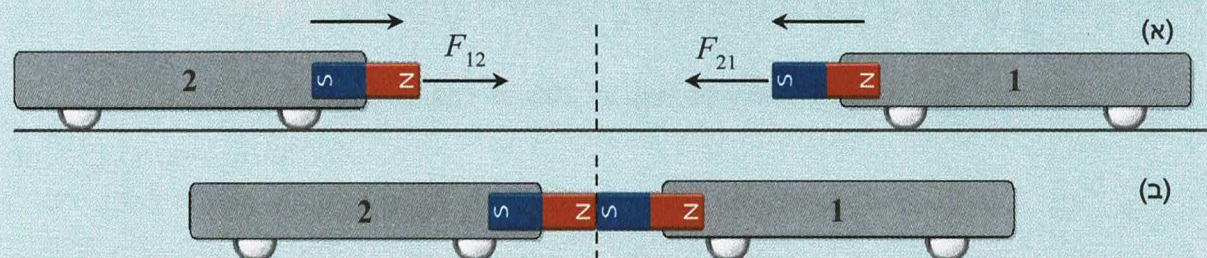
פתרון:

על הגוף פועל כוח הכבידה (הגרביטציה) המסומן ב- F_G . כדור הארץ הוא שמפעיל כוח זה. על פי החוק השלישי של ניוטון, הכוחות נובעים מאינטראקציה בין גופים. במערכת הנתונה בשאלה זו קיימת אינטראקציה בין הגוף לכדור הארץ. כתוצאה מאינטראקציה זו, כדור הארץ מפעיל על הגוף כוח F_G , והגוף מפעיל על כדור הארץ כוח F'_G כפי שמתואר באיור 24. שני הכוחות F_G ו- F'_G הם כוחות אינטראקציה השווים בגודלם ומנוגדים בכיוונם.



איור 24: הכוחות הפועלים בין כדור הארץ והגופים בסביבתו הם כוחות אינטראקציה השווים בגודלם ומנוגדים בכיוונם.

נשאלת השאלה: אם שני הכוחות F_G ו- F'_G שווים בגודלם, למה הגוף הוא שנע כלפי כדור הארץ בזמן שכדור הארץ אינו נע כלפי הגוף? התשובה לשאלה זו מוסברת באמצעות ניסוי פשוט המתואר באיור 25.



איור 25: (א) כוחות אינטראקציה הפועלים על שני מגנטים הצמודים לשתי עגלות מסות זהות. (ב) כאשר משחררים את שתי העגלות ממנוחה במרחק מסוים זה מזה הן נפגשות באמצע הדרך ביניהן.

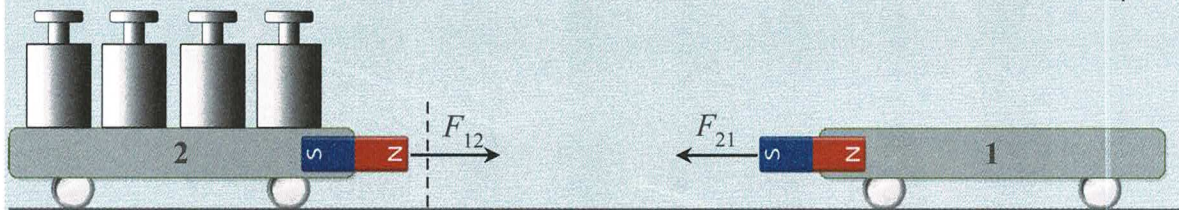
באיור זה מוצגות שתי עגלות 1 ו-2 בעלות מסה זהה הנמצאות במרחק מסוים זה מזה. לשתי העגלות מוצמדים שני מגנטים חזקים מאוד, כך שהקוטב הצפוני של מגנט אחד נמצא מול הקוטב הדרומי של המגנט האחר (ראה איור 25א). במצב זה מופעל כוח משיכה מגנטי $\vec{F}_{12}$ על העגלה 2, ומופעל כוח משיכה מגנטי $\vec{F}_{21}$ על העגלה 1. שני כוחות אלה הם כוחות אינטראקציה השווים בגודלם והמנוגדים בכיוונם ($\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$). אם נשחרר את שתי העגלות ממנוחה, הן ינועו אחת לקראת השנייה עד שתפגשנה באמצע המרחק ביניהן (בגלל שהמסות שלהן שוות) כפי שמתואר באיור 25ב.

מכניקה ניוטונית – כרך א פרק 5: כוחות והחוק השלישי של ניוטון

חוזרים על הניסוי מספר פעמים נוספות, ובכל פעם מגדילים את מסת העגלה הנמצאת מצד שמאל (העגלה 2) כפי שמתואר באיור 26.

ענה על השאלות הבאות:

1. מהו הקשר בין הכוחות $\vec{F}_{12}$ ו- $\vec{F}_{21}$ בכל אחד מניסויים אלה?
2. האם העגלות ייפגשו בנקודת האמצע שבין שתי העגלות בכל אחד מהניסויים? אם השבת ב"כן" הסבר מדוע, ואם השבת ב"לא" קבע האם נקודת המפגש תהיה קרובה יותר לעגלה בעלת המסה הגדולה יותר או לעגלה בעלת המסה הקטנה יותר?
3. תאר מה היה קורה אם מסת העגלה 2 הייתה גדולה מאוד ביחס לעגלה 1 (נניח 1000 kg לעומת 0.2 kg).
4. על סמך תשובותיך לסעיפים הקודמים הסבר מדוע הגופים נעים לכיוון כדור הארץ וכדור הארץ לא נע לכיוונם.

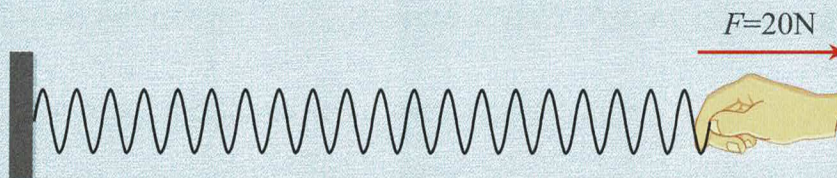


איור 26: כאשר משחררים את העגלות ממנוחה, הן נפגשות בנקודה הקרובה יותר לעגלה שמסתה גדולה יותר.

ברור שהשפעת כוח מסוים על גוף מסוים אינה תלויה בגודל הכוח בלבד, אלא גם במסת הגוף. זהו נושא בו נדון בפרק 7.

בעיה 2

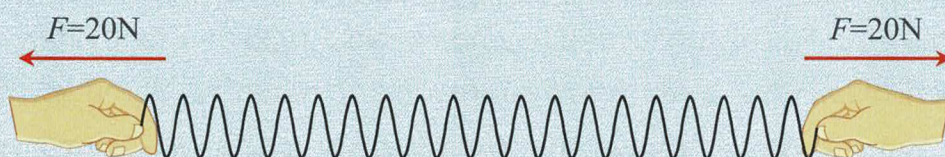
תלמיד מחבר קצה קפיץ לנקודה קבועה בקיר ומפעיל על הקצה האחר של הקפיץ כוח שגודלו 20 N כפי שמתואר באיור 27.



איור 27: תלמיד מפעיל כוח של 20 N על קצה קפיץ שקצהו האחר קשור לקיר.

נתון: קבוע הקפיץ 200 N/m .

- א. מהו גודלו וכיוונו של הכוח שהקפיץ מפעיל על כף ידו של התלמיד?
- ב. חשב את התארכות הקפיץ.
- ג. קבע את גודלם וכיוונם של הכוחות הפועלים על קצוות הקפיץ, וציין מי מפעיל כוחות אלה.
- ד. התלמיד משחרר את הקפיץ מהקיר, אווז בשני קצותיו ומפעיל על כל קצה כוח של 20 N בשני כיוונים מנוגדים כפי שמתואר באיור 28. האם התארכות הקפיץ במצב זה גדולה מהתארכותו במצב המתואר באיור 27, קטנה ממנה או שווה לה? הסבר את תשובתך.



איור 28: התלמיד מפעיל על קצוות הקפיץ כוחות, 20 N על כל קצה, בכיוונים מנוגדים.

פתרון:

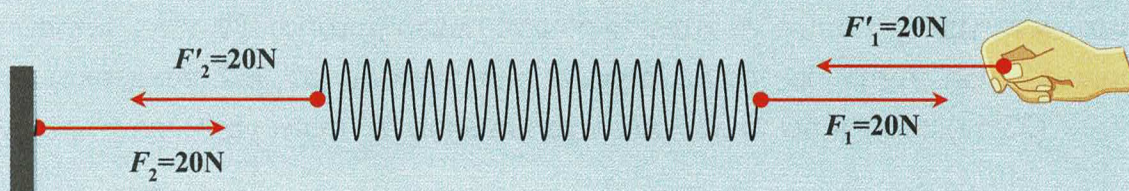
א. בין כף היד ובין קצה הקפיץ קיימת אינטראקציה הדדית. על פי החוק השלישי של ניוטון, הקפיץ מפעיל על כף ידו של התלמיד כוח השווה בגודלו ומנוגד בכיוונו לכוח שכף היד מפעילה על קצה הקפיץ, כלומר כוח של 20 N בכיוון שמאל באיור 27.

ב. מכיוון שפועל על הקפיץ כוח של 20 N , נקבל על פי חוק הוק:

$$\Delta \ell = \frac{F}{k} = \frac{20\text{ N}}{200\text{ N/m}} = 0.1\text{ m}$$

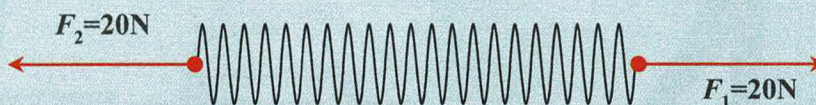
ג. בקצה הימני של הקפיץ התלמיד מפעיל כוח F_1 שגודלו 20 N בכיוון ימין (ראה איור 29). בקצה השמאלי של הקפיץ, הקפיץ מפעיל על הקיר כוח F_2 שגודלו 20 N וכיוונו ימין, ועל פי החוק השלישי של ניוטון, הקיר מפעיל על קצה זה של הקפיץ כוח F'_2 השווה בגודלו ומנוגד בכיוונו לכוח F_2 , כלומר כוח שגודלו 20 N בכיוון שמאל, כפי שמתואר באיור 29.

לכן, הכוחות הפועלים על קצוות הקפיץ הם $F_1 = 20\text{ N}$ בכיוון ימין ו- $F'_2 = 20\text{ N}$ בכיוון שמאל (ראה איור 29).



איור 29: כוחות האינטראקציה בקצוות הקפיץ.

ד. בתרשים הבא מתוארים הכוחות שהתלמיד מפעיל על קצוות הקפיץ, שבמקרה זה הם $F_1 = 20\text{ N}$ על הקצה הימני בכיוון ימין ו- $F_2 = 20\text{ N}$ על הקצה השמאלי בכיוון שמאל.



אם נשווה בין הכוחות הפועלים על קצוות הקפיץ במצב המתואר בסעיף זה ובין הכוחות הפועלים על קצוות הקפיץ במצב המתואר בסעיף הקודם (שבו קצה הקפיץ קשור לקיר), נמצא שגודלם וכיוונם של הכוחות בשני המקרים זהה. לכן התארכות הקפיץ בשני המקרים זהה.

בעיה 3

אדם דוחף עגלה על ידי הפעלת כוח F_1 על העגלה בכיוון שמאל כפי שמתואר באיור 30.

א. ציין מהו גודל וכיוון הכוח שהעגלה מפעילה על האדם.

ב. התייחס לתשובתך לסעיף א' והסבר איך מצליח האדם לנוע ביחד עם העגלה בכיוון שמאל.

פתרון:

א. על פי החוק השלישי של ניוטון, העגלה מפעילה על האדם כוח השווה בגודלו והמנוגד בכיוונו לכוח שהאדם מפעיל על העגלה. כלומר כוח F'_1 השווה בגודלו ל- F_1 והמכוון ימין כפי שמתואר באיור 31.

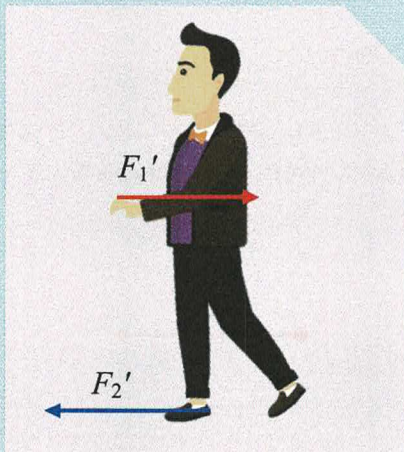


איור 31: על האדם פועל כוח השווה בגודלו ומנוגד בכיוונו לכוח שהוא מפעיל על העגלה.

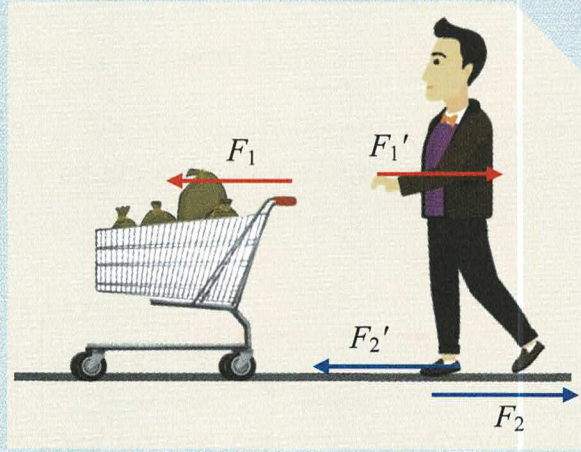


איור 30: אדם דוחף עגלה.

ב. במצב המתואר באיור 31, האדם אמור להידחף ימינה בהשפעת הכוח F_1' המופעל עליו מהעגלה כך שהוא אינו יכול להתקדם שמאלה ביחד עם העגלה. על מנת שנבין איך הוא מצליח בכל זאת להתקדם שמאלה ביחד עם העגלה, יש להביא בחשבון את האינטראקציה בין רגלי האדם ובין הרצפה. במהלך דחיפת העגלה, האדם מפעיל באמצעות רגליו כוח F_2 על הרצפה המכוון אחורה כפי שמתואר באיור 32, וכתגובה, הרצפה מפעילה עליו כוח F_2' השווה ל- F_2 בגודלו אך מנוגד לו בכיוון (ראה באיור 32). לכן על האדם פועלים בכיוון האופקי שני כוחות; הכוח F_1' שהעגלה מפעילה עליו בכיוון ימין והכוח F_2' שהרצפה מפעילה עליו בכיוון שמאל (ראה איור 33).



איור 33: הכוחות הפועלים על האדם כאשר הוא דוחף את העגלה.



איור 32: כאשר האדם דוחף את העגלה הוא מפעיל על הרצפה כוח בכיוון אחורה, והרצפה מפעילה עליו כוח שווה בכיוון קדימה.

על מנת שהאדם יצליח להתקדם שמאלה ביחד עם העגלה, צריך להתקיים ש- $F_2' > F_1'$. מכיוון שעל פי החוק השלישי של ניוטון מתקיים; $F_1' = F_1$ ו- $F_2' = F_2$, נקבל שעל מנת שהאדם יצליח להתקדם ביחד עם העגלה, צריך אפוא להתקיים $F_2 > F_1$. כלומר הכוח שהאדם מפעיל על הרצפה לאחר צריך להיות גדול מהכוח שהוא מפעיל על העגלה קדימה.

בעיה 4

אדם גורר עגלה כפי שמתואר באיור 34.

- ציין את הכוחות הפועלים על האדם ועל העגלה בכיוון תנועת העגלה.
- הסבר באמצעות הכוחות שצינת בסעיף הקודם כיצד האדם מצליח למשוך את העגלה.

מכניקה ניוטונית – כרך א פרק 5: כוחות והחוק השלישי של ניוטון

ג. האם האדם היה מצליח למשוך את העגלה אם המשטח שעליו הוא עומד היה חלק (קרח לדוגמה)? הסבר.

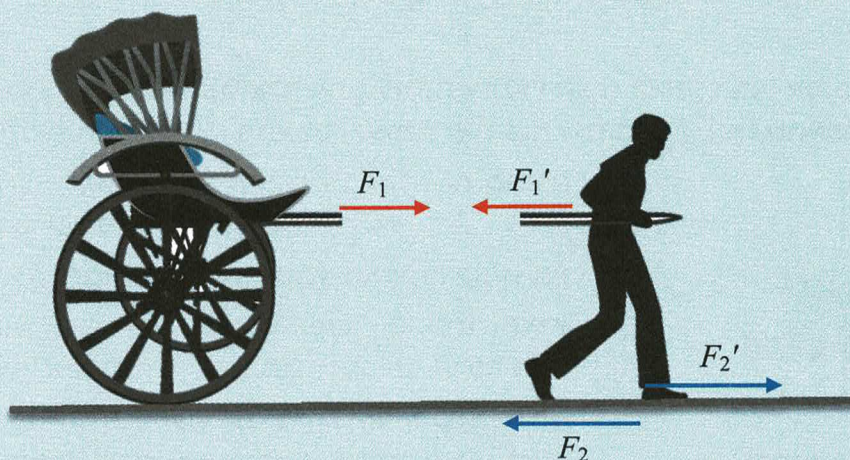


איור 34: אדם גורר עגלה.

פתרון:

א. על העגלה פועל בכיוון תנועתה הכוח F_1 שמפעיל האדם (ראה איור 35). על פי החוק השלישי של ניוטון, העגלה מפעילה על האדם כוח השווה בגודלו ומנוגד בכיוונו לכוח F_1 שהאדם מפעיל על העגלה. כוח זה מסומן ב- F_1' באיור 35 ומכוון שמאלה בתרשים.

בנוסף, בתהליך גרירת העגלה, קיימת אינטראקציה בין רגלי האדם והרצפה. האדם מפעיל על הרצפה כוח F_2 המכוון לאחור (בכיוון שמאל באיור 35), ועל פי החוק השלישי של ניוטון, הרצפה מפעילה על האדם כוח השווה בגודלו ומנוגד בכיוונו לכוח F_2 . כוח זה מסומן ב- F_2' באיור 35 ומכוון ימינה.



איור 35: הכוחות האופקיים הפועלים על האדם ועל העגלה בכיוון התנועה.

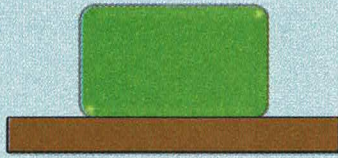
ב. על מנת שהאדם יצליח לגרור את העגלה, צריך להתקיים שהכוח F_2' שמופעל עליו על ידי הרצפה בכיוון ימין (איור 35) יהיה גדול מהכוח F_1' המופעל עליו על ידי העגלה בכיוון שמאל, כלומר $F_2' > F_1'$. מכיוון שעל פי החוק השלישי של ניוטון מתקיים: $F_1' = F_1$ ו- $F_2' = F_2$, נקבל שעל מנת שהאדם יצליח לגרור את העגלה, צריך להתקיים: $F_2 > F_1$, כלומר שהכוח שהאדם מפעיל על הרצפה יהיה גדול יותר מהכוח שהוא מפעיל על העגלה.

ג. אם המשטח עליו עומד האדם היה חלק, האדם לא היה יכול להפעיל כוח על הרצפה, כלומר

מכניקה ניוטונית – כרך א פרק 5: כוחות והחוק השלישי של ניוטון

הכוח F_2 באיור 35 היה מתאפס, ולכן גם הכוח F_2' שאמור לפעול על האדם בכיוון קדימה מתאפס, ולכן הוא לא יוכל להתקדם ביחד עם העגלה.

בעיה 5



מניחים על משטח אופקי גוף שמסתו m כפי שמתואר בתרשים שלפניך.

א. ציין באמצעות חיצים את הכוחות הפועלים על הגוף, ורשום ליד כל חץ את שם הכוח שהוא מייצג.

ב. הראה שהכוחות שציינת בסעיף הקודם אינם כוחות אינטראקציה (כוחות פעולה ותגובה).

ג. קבע מהו כוח התגובה לכל אחד מהכוחות שציינת בסעיף הקודם.

פתרון:

א. הכוחות הפועלים על הגוף הם:

1. כוח הכובד $F_G = 10m$ המכוון כלפי מטה בכיוון

מרכז כדור הארץ (בכיוון ניצב למשטח).

2. הכוח הנורמלי N שהמשטח מפעיל על הגוף בכיוון

ניצב לפני המשטח כלפי מעלה. כוחות אלה

מתוארים באיור 36.

ב. הכוחות F_G ו- N אינם כוחות אינטראקציה (כלומר אינם

כוחות פעולה ותגובה) מהסיבה הבאה:

כוחות האינטראקציה נוצרים מאינטראקציה בין שני גופים שונים, ולכן הם פועלים על שני גופים שונים, ואינם יכולים לפעול על אותו גוף. הכוחות F_G ו- N פועלים על אותו גוף, לכן הם אינם יכולים להיות כוחות אינטראקציה (כוחות פעולה ותגובה).

ניתן להוכיח באופן מעשי שכוחות אלה אינם כוחות אינטראקציה באופן הבא: אם מרימים את הגוף מעל המשטח, הכוח הנורמלי N מתאפס, לעומת זאת כוח הכובד F_G אינו מתאפס. אם N ו- F_G

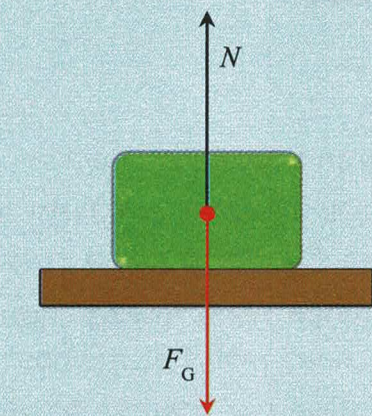
היו כוחות פעולה ותגובה היינו מקבלים במקרה זה סתירה עם החוק השלישי של ניוטון.

ג. כוח הכובד F_G הפועל על הגוף נובע מאינטראקציה בין הגוף וכדור הארץ, כתוצאה מאינטראקציה זו כדור הארץ מפעיל על הגוף את הכוח F_G המכוון לכיוון מרכז כדור הארץ, ובו זמנית, הגוף מפעיל על כדור הארץ כוח השווה בגודלו ל- F_G ומנוגד לו בכיוון. כוח זה מסומן ב- F_G' (ראה איור 37).

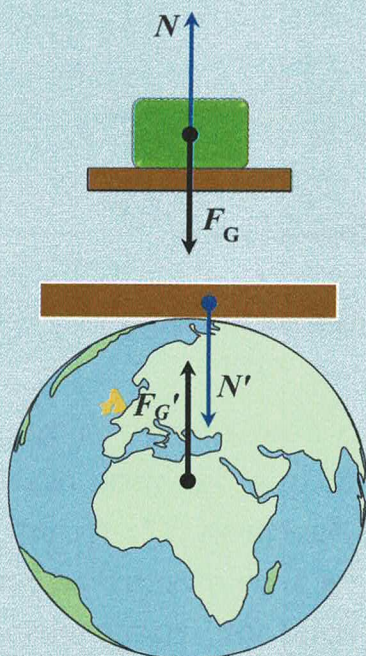
הכוח הנורמלי נובע מאינטראקציה בין הגוף והמשטח עליו מונח הגוף. כתוצאה מאינטראקציה זו המשטח מפעיל על הגוף את הכוח הנורמלי N והגוף מפעיל על המשטח כוח השווה בגודלו ומנוגד בכיוונו לכוח N . כוח זה מסומן באות N' באיור 37.

מסקנה:

הכוח שמפעיל גוף על משטח עליו הוא מונח איננו כוח הכובד F_G , כי כוח זה פועל על הגוף ולא על המשטח. הכוח



איור 36: הכוחות הפועלים על גוף המונח על משטח



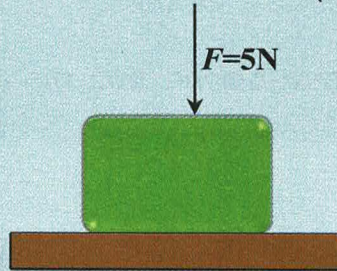
איור 37: כוחות האינטראקציה בבעיה 5.

מכניקה ניוטונית – כרך א פרק 5: כוחות והחוק השלישי של ניוטון

שמפעיל גוף על המשטח עליו הוא מונח הוא הכוח N' , שהוא כוח נורמלי השווה בגודלו ומנוגד בכיוונו לכוח הנורמלי N שהמשטח מפעיל על הגוף.

בעיה 6

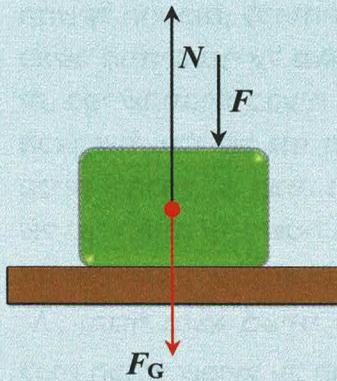
בתרשים שלפניך מתואר גוף שמסתו $m = 2\text{ kg}$ המונח על משטח אופקי. על הגוף מופעל כוח F שגודלו 5 N בכיוון מטה (ראה תרשים).



חשב את גודלם וכיוונם של הכוחות הפועלים על הגוף, וחשב את גודלו וכיוונו של הכוח שהגוף מפעיל על המשטח.

פתרון:

על הגוף פועלים הכוחות המתוארים בתרשים הבא, והם:

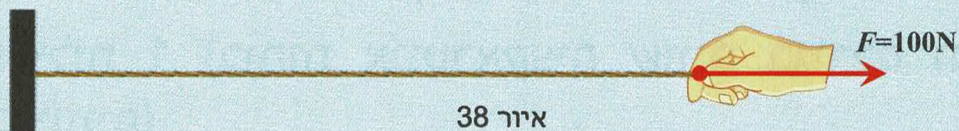


1. הכוח F הנתון שגודלו 5 N וכיוונו כלפי מטה.
2. כוח הכובד F_G שגודלו 20 N וכיוונו כלפי מטה.
3. הכוח הנורמלי N שהמשטח מפעיל על הגוף בכיוון ניצב למשטח כלפי מעלה. מכיוון שכוח זה מאזן את שני הכוחות F ו- F_G , ומכיוון שכל הכוחות האלה נמצאים על אותו קו ישר נקבל ש- $N = F + F_G = 25\text{ N}$.

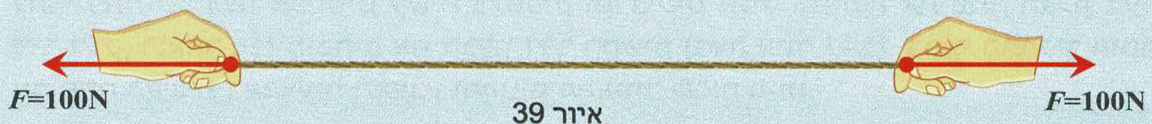
על פי החוק השלישי של ניוטון, הגוף מפעיל על המשטח כוח N' השווה בגודלו ומנוגד בכיוונו לכוח N שהמשטח מפעיל על הגוף, כלומר כוח של 25 N כלפי מטה.

בעיה 7

תלמיד קושר קצה אחד של חוט לקיר ומפעיל על קצהו האחר כוח של 100 N כפי שמתואר באיור 38.



לאחר מכן התלמיד מחזיק חוט זהה משני קצותיו ומפעיל על כל צד כוח של 100 N כפי שמתואר באיור 39.



קבע אם ההסתברות שהחוט ייקרע גדולה יותר באחד משני המקרים המתוארים. הסבר תשובתך.

פתרון:

הכוחות המופעלים על החוט בשני המקרים הם זהים לחלוטין. במקרה הראשון שבו התלמיד קושר קצה אחד של החוט לקיר ומפעיל כוח של 100 N על קצהו האחר, קיימת אינטראקציה בין קצה החוט הקשור לקיר ובין הקיר, כך שהחוט מפעיל על הקיר כוח של 100 N בכיוון ימין, וכתוצאה

מכניקה ניוטונית – כרך א פרק 5: כוחות והחוק השלישי של ניוטון

מכר הקיר מפעיל על קצה זה של החוט כוח של 100 N בכיוון שמאל, כפי שמתואר באיור 40 וזאת על פי החוק השלישי של ניוטון.



לכן הכוחות הפועלים על קצוות החוט בשני המקרים זהים, וההסתברות שהחוט ייקרע בשני המקרים היא זהה.

6. המשקל

משקל גוף מוגדר כקריאת מאזני הכוח כאשר מניחים עליו את הגוף או כקריאת הדינמומטר כאשר תולים עליו גוף זה.

המשקל מסומן באות W מהמילה הלועזית (Weight) שפרושה משקל.

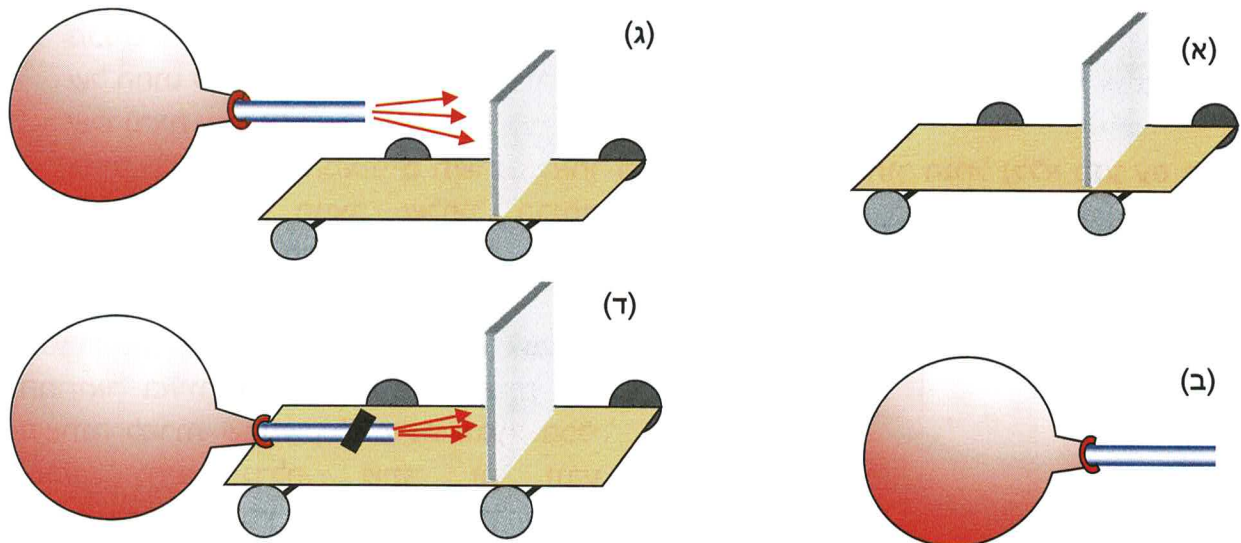
הערות:

- המשקל הוא כוח, לכן יחידות המשקל הן יחידות כוח (ניוטונים).
- כאשר מניחים גוף על מאזני כוח, המאזניים מודדים את הכוח המופעל על המשטח שלהם. כוח זה, כפי שהסברנו בבעיה 5 בסעיף הקודם, שווה לכוח N' שהגוף מפעיל על משטח המאזניים. מכאן שמשקלו של גוף המונח על משטח מסוים שווה לכוח N' שהגוף מפעיל על המשטח. מכיוון שהכוח N' שווה בגודלו תמיד לכוח N שהמשטח מפעיל על הגוף, ניתן לומר שמשקלו של גוף המונח על משטח מסוים שווה בגודלו לכוח הנורמלי N שהמשטח מפעיל על הגוף.
- אם מניחים גוף על משטח אופקי של מאזניים כך שלא פועל עליו כוח אחר מלבד הכוחות F_G ו- N , והגוף נמצא בשיווי משקל. במצב זה מתקיים ש- $N = F_G$. במקרה זה משקל הגוף שווה לכוח הכובד שפועל על הגוף ($W = F_G$).
- במקרים בהם הכוח הנורמלי N אינו שווה לכוח הכובד F_G (ראה בעיה 6 בסעיף הקודם), משקל הגוף לא יהיה שווה לכוח הכובד שפועל עליו ($W \neq F_G$).

7. פעילויות וניסויים בחוק השלישי של ניוטון

7.1. פעילות 1 (כוחות אינטראקציה שווים בגודלם ומנוגדים בכיוונים)

- לוקחים עגלה קטנה ומצמידים לה חתיכת פלסטיק בעלת צורה מלבנית כך שחתיכת פלסטיק זו ממלאת תפקיד של מפרש בפעילות זו (ראה איור 41א).
- לתוך פתח של בלון מכניסים קשית פלסטיק ומדביקים אליה בחוזקה את פתח הבלון בעזרת נייר דבק, ולאחר מכן מנפחים את הבלון דרך הקשית (ראה איור 41ב). בסוף התהליך חוסמים את פתח הקשית באמצעות האצבע ומונעים מהאוויר לצאת ממנו.
- מכוונים את פתח הקשית למפרש של העגלה ומסירים את האצבע מפתח הקשית. האוויר זורם דרך פתח הקשית לעבר המפרש, כפי שמתואר באיור 41ג. תאר מה קורה לעגלה במצב זה.
- מנפחים שוב את הבלון וחוסמים את פתח הקשית באמצעות האצבע. מדביקים את הקשית על העגלה כשהפתח שלה מכוון לעבר המפרש. לאחר מכן משחררים את האוויר על ידי הסרת האצבע מפתח הקשית. כקודם, גם כעת האוויר זורם דרך פתח הקשית לעבר המפרש, כפי שמתואר באיור 41ד. תאר מה קורה לעגלה במצב זה. הסבר.



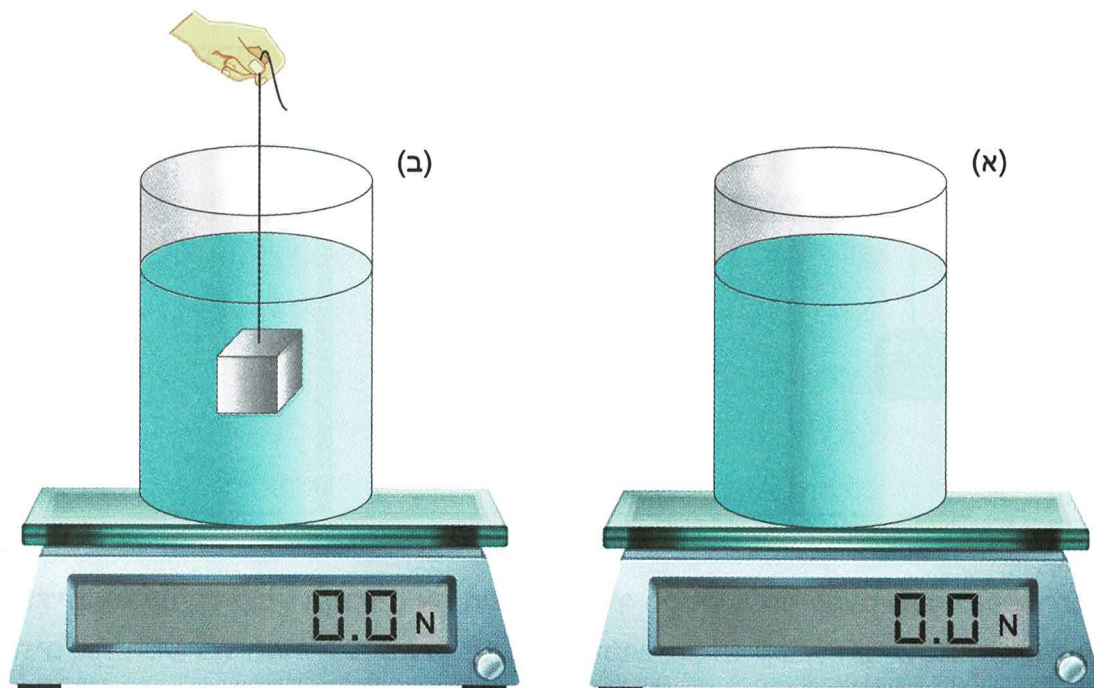
איור 41: (א) עגלה שמוצמד לה מפרש. (ב) בלון נפוח הכולל קשית המוצמדת לפתחו. (ג) האוויר המשתחרר מהבלון מופנה למפרש. (ד) האוויר המשתחרר מהבלון מופנה למפרש כשהבלון מוצמד לעגלה.

7.2. פעילות 2 (כוח העילוי והחוק השלישי של ניוטון)

ידוע כי נוזלים מפעילים כוח על הגופים הנמצאים בתוכם, כוח המכוון כלפי מעלה. כוח זה נקרא כוח עילוי ומסומן ב- F_B (מהמונח הלועזי Buoyant Force). כוח זה גורם לגוף לצוף, אם הוא גדול מכוח הכובד F_G שפועל על הגוף (אם $F_B > F_G$), וגורם להקטנת משקל הגוף אם כוח העילוי קטן מכוח הכובד שפועל על הגוף ($F_B < F_G$). לכן, כתוצאה מכוח העילוי משקלם של גופים הנמצאים בתוך נוזל קטן ממשקלם באוויר.

ניעזר בכוח העילוי על מנת להדגים את החוק השלישי של ניוטון באמצעות הפעילות הבאה:

- מניחים כלי (עדיף כלי עשוי מזכוכית שקופה) על מאזניים וממלאים אותו במים עד לגובה מסוים כפי שמתואר באיור 42

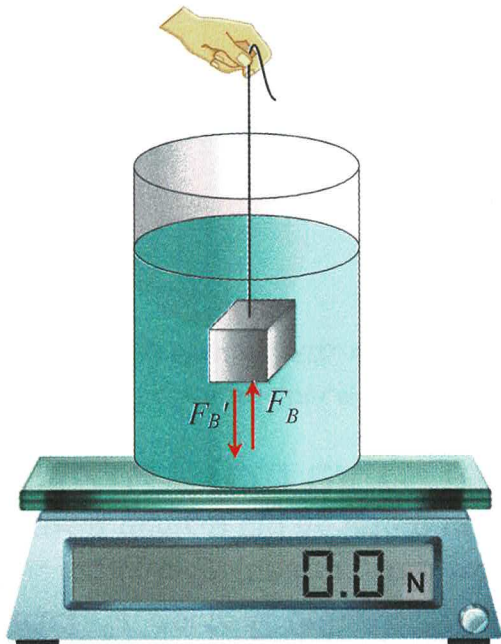


איור 42: (א) כלי המכיל מים מונח על מאזני כוח. (ב) גוף קשור לקצה חוט ומוכנס לתוך הנוזל.

מכניקה ניוטונית – כרך א פרק 5: כוחות והחוק השלישי של ניוטון

2. רושמים את קריאת המאזניים (את משקל הכלי כולל המים שבתוכו).
3. מכניסים אל תוך המים משקולת (עשויה ממתכת) הקשורה לקצה חוט, ומחזיקים בקצה השני של החוט כך שהמשקולת נמצאת בתוך המים, כך שהיא אינה נוגעת בדפנות הכלי או בתחתית שלו (ראה איור 42ב).

4. בדוק האם קריאת המאזניים תשתנה לאחר הכנסת המשקולת לתוך הנוזל (ללא מגע עם הכלי עצמו) לעומת המצב שלפני הכנסת המשקולת. אם הקריאה משתנה, הסבר למה.

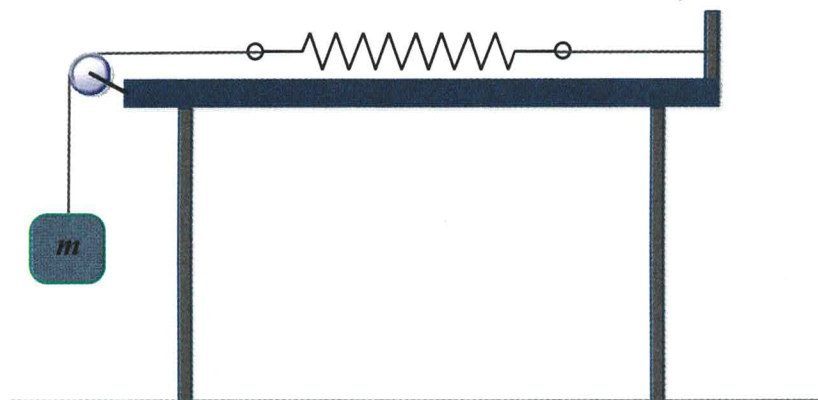


איור 43: הנוזל מפעיל על הגוף כוח עילוי כלפי מעלה והגוף מפעיל על הנוזל כוח זהה כלפי מטה.

הסבר: אם נבצע את הניסוי נגלה שבמצב המתואר באיור 42ב, קריאת המאזניים אכן משתנה למרות שהמשקולת אינה נוגעת בכלי עצמו, והיא גדלה. שינוי זה נובע מהאינטראקציה בין המשקולת ובין הנוזל. כתוצאה מאינטראקציה זו, הנוזל מפעיל על המשקולת כוח עילוי F_B כלפי מעלה, כפי שמתואר באיור 43, ועל פי החוק השלישי של ניוטון, המשקולת מפעילה על הנוזל כוח F_B' השווה ל- F_B בגודלו והמנוגד לו בכיוון, כלומר כלפי מטה כפי שמתואר באיור 43. הכוח F_B' שהגוף מפעיל על הנוזל עובר למאזניים ולכן קריאת המאזניים גדלה בשיעור F_B' השווה ל- F_B (כוח העילוי). לכן קריאת המאזניים גדלה במצב זה בשיעור כוח העילוי F_B .

7.3 פעילות 3

1. בונים את המערכת המתוארת באיור 44 כך שהקפיץ נמצא במצב אופקי, קצה אחד שלו קשור באמצעות חוט לנקודה קבועה בקיר והקצה האחר שלו קשור לקצה חוט סביב גלגלת. לקצה השני של חוט זה קשורה מסה m התלויה באוויר.

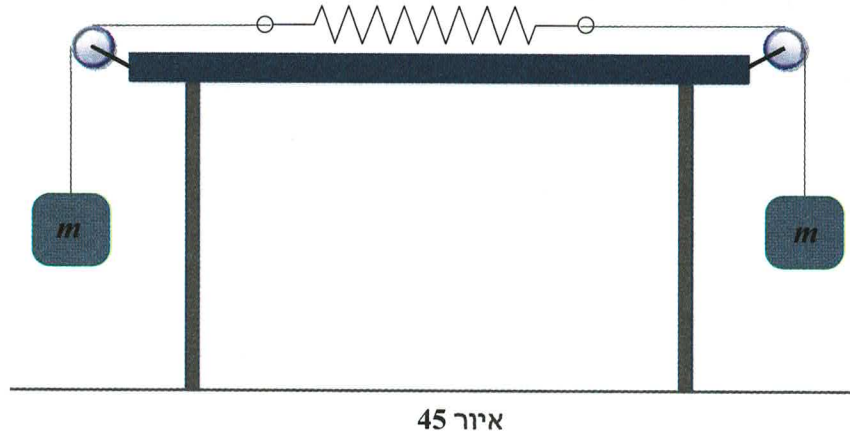


איור 44

2. מודדים את אורך הקפיץ וקובעים את השינוי באורך הקפיץ ביחס למצב שבו הקפיץ רפוי.
3. בונים את המערכת המתוארת באיור 45 תוך שימוש באותו קפיץ, וכך ששתי המסות של שני הגופים הקשורים באמצעות חוטים לקצוות הקפיץ זהות, m כל אחת, כאשר m היא אותה מסה כמו בפעילות המתוארת באיור 44.

מכניקה ניוטונית – כרך א פרק 5: כוחות והחוק השלישי של ניוטון

4. מודדים את השינוי באורך הקפיץ במצב המתואר באיור 45 ומשווים לשינוי באורך הקפיץ שהתקבל בניסוי הראשון.
5. האם השינוי באורך הקפיץ בניסוי השני שווה לשינוי באורך הקפיץ בניסוי הראשון, גדול ממנו או קטן ממנו? הסבר.



סיכום פרק 5

- לכוחות אלה בשם כוחות אינטראקציה.
4. כוחות האינטראקציה (הפעולה והתגובה) הם תמיד שווים בגודלם ומנוגדים בכיוונם.
5. החוק השלישי של ניוטון: בכל המקרים שיש בהם השפעה הדדית בין שני גופים, שני הגופים מפעילים זה על זה כוחות השווים בגודלם והמנוגדים בכיוונם.
- הניסוח המקורי של ניוטון לחוק זה הוא: לכל פעולה יש תגובה השווה לה בגודל ומנוגדת בכיוון.
6. יחידת הכוח "ניוטון" היא גודלו של כוח הכובד הפועל בקרבת פני כדור הארץ על משקולת שמסתה 102g . לשם פשטות משתמשים בקירוב שניוטון אחד שווה לכוח הכובד הפועל בקרבת פני כדור הארץ על משקולת שמסתה 100g . על פי קירוב זה כוח הכובד שמפעיל כדור הארץ על מסה שגודלה 1kg ($1,000\text{g}$) הוא 10N .
7. בין כל שני גופים שיש להם מסה קיימת אינטראקציה הגורמת להם להימשך זה לזה. אינטראקציה זו מתוארת על ידי זוג של כוחות אינטראקציה שהם כוחות משיכה הפועלים על כל אחד משני הגופים. כוחות אלה נקראים כוחות כבידה או כוחות גרביטציוניים, ומסומנים ב- F_G מהלועזית Gravitational Force.
- הכוח הגרביטציוני הפועל על כל אחד משני הגופים פרופורציוני למסה של כל אחד מהם ופרופורציוני הפוך לריבוע המרחק בין שני

1. על מנת להסביר "איך נוצרת המשיכה או הדחיה בין הגופים", אייזק ניוטון (וגם הפיזיקאים שבאו אחריו) השתמשו במונח אינטראקציה. במקרים בהם גופים נמשכים זה לזה או דוחים זה את זה, אנחנו אומרים שיש בין הגופים השפעה הדדית (אינטראקציה) הגורמת להם להימשך זה לזה או לדחות זה את זה.
2. על מנת לתאר באופן כמותי את עוצמת ההשפעה של כל אחד משני הגופים על הגוף האחר, ניוטון השתמש במושג הכוח. במקום שנאמר שכל אחד משני הגופים משפיע על הגוף האחר וגורם למשיכה או לדחייה שלו, ניוטון תיאר זאת בכך שכל אחד משני הגופים מפעיל על הגוף האחר כוח, וכוח זה הוא שגורם לכל אחד משני הגופים להימשך לגוף האחר או להידחות ממנו.
3. על מנת להבחין בין כל אחד משני הכוחות הפועלים על כל אחד משני הגופים במקרים בהם יש אינטראקציה בין גופים אלה, ניוטון קרא לאחד כוחות אלה **פעולה** ולכוח האחר קרא **תגובה**. מבחינת המשמעות המילולית, הפעולה קודמת לתגובה, אבל במקרה של כוחות הפעולה והתגובה, הם סימטריים וזהים לחלוטין (עד כדי כיוון פעולתם, מאחר וכיווניהם מנוגדים). הם פועלים בו זמנית על שני הגופים, וכל אחד מהם יכול להיקרא פעולה והאחר תגובה. מכיוון שהשמות פעולה ותגובה יכולים לגרום לאי הבנה לגבי הסימטריה של כוחות אלה, נהוג כיום לקרוא

הגופים.

כוח הכבידה הפועל על גופים על פני כדור הארץ (או על פני כוכב לכת אחר) נקרא כוח הכובד, גם כן.

8. על פי הגדרת יחידת הכוח, הניוטון, נקבל שכוח הכובד שפועל על קילוגרם אחד הוא 10 ניוטונים כלומר (10 N/kg) . לכן אם נתון גוף שמסתו m קילוגרמים, כוח הכובד שיפעל עליו על פני כדור הארץ נתון על ידי הקשר: $F_G = \left(10 \frac{\text{N}}{\text{kg}}\right) \cdot m$.

9. הכוח הנורמלי הוא כוח שמפעיל המשטח על הגוף המונח עליו. מקור כוח זה הוא המשטח, וברמה מיקרוסקופית, מקור כוח זה הוא הכוחות הפועלים בין חלקיקי החומר ממנו בנוי המשטח, ואשר נובעים מהאלסטיות של החומר. כוחות אלה מסתכמים לכוח שקול שפועל על הגוף.

התכונה הבסיסית של כוח זה היא שהוא ניצב למשטח עליו מונח הגוף. לכן כוח זה נקרא כוח נורמלי (ניצב), ומסומן באות N .

10. כאשר קושרים קצה חוט לגוף המונח על משטח ומושכים בקצהו האחר החוט נמתח. במקרה זה, המרחקים בין חלקיקי החומר ממנו עשוי החבל גדלים (ברמה המיקרוסקופית), וכתוצאה מהאלסטיות של החומר, כל חלקיק מפעיל על החלקיק שלידו כוח. כוח זה הוא המקור למתיחות בחבל. סכום כל הכוחות הפועלים בין חלקיקי החומר לרוחב החבל מסתכמים לכוח שקול המכוון בכיוון החבל, ונקרא המתיחות בחבל. כוח זה מסומן באות T מהמילה הלועזית Tension שפרושה מתיחות.

11. על מנת שהחבל יהיה מתוח (על מנת שיפעל לאורכו הכוח T), צריך שיפעלו על שני קצותיו כוחות מנוגדים.

12. כוח הקפיץ המסומן ב- F_{sp} הוא כוח שהקפיץ מפעיל כאשר משנים את אורכו (כאשר לוחצים אותו או מותחים אותו). כוח זה הוא מכוון בכיוון מנוגד לשינוי באורך הקפיץ והוא נמצא ביחס ישר לשינוי $\Delta \ell$ באורך הקפיץ, כך שמתקיים: $F_{sp} = k \Delta \ell$, כאשר k הוא

קבוע הפרופורציה, ונקרא **קבוע הקפיץ**.

13. יחידת קבוע הקפיץ היא N/m . גודל זה מבטא את השינוי בכוח שהקפיץ מפעיל בעקבות שינוי אורכו ביחידת אורך אחת.

14. מכיוון שהכוח שהקפיץ מפעיל שווה לכוח

החיצוני המופעל על הקפיץ, ניתן לתת לקבוע הקפיץ גם את המשמעות הבאה: קבוע הקפיץ מבטא את גודל השינוי בכוח החיצוני המופעל על הקפיץ הנדרש על מנת לשנות את אורך הקפיץ ביחידת אורך אחת.

15. קפיץ עשוי לשמש גם כמכשיר למדידת כוח. במקרה זה הוא נקרא **דינמומטר**.

16. משקל גוף מוגדר כקריאת הדינמומטר כאשר תולים עליו גוף זה, או כקריאת מאזני הכוח כאשר מניחים עליו את הגוף. המשקל מסומן באות W מהמילה הלועזית (Weight) שפרושה משקל. המשקל הוא כוח, לכן יחידות המשקל הן יחידות כוח (ניוטונים).

17. כאשר מניחים גוף על מאזני כוח, הכוח שהגוף מפעיל על המאזניים הוא כוח השווה בגודלו ומנוגד בכיוונו לכוח הנורמלי N שהמאזניים מפעילים על הגוף. לכן המאזניים מודדים כוח השווה לכוח הנורמלי הפועל על הגוף. במלים אחרות משקל הגוף שווה לכוח הנורמלי N .

18. אם מניחים גוף על משטח אופקי של מאזניים כך שלא פועל עליו כוח אחר מלבד הכוחות F_G ו- N , והגוף נמצא בשיווי משקל. במצב זה מתקיים ש- $N = F_G$, לכן במקרה זה משקל הגוף שווה לכוח הכובד שפועל על הגוף $(W = F_G)$. במקרים בהם הכוח הנורמלי N אינו שווה לכוח הכבידה F_G , משקל הגוף לא יהיה שווה לכוח הכבידה שפועל עליו $(W \neq F_G)$.

תרגילים ובעיות – פרק 5

1. כוחות אינטראקציה והחוק השלישי של ניוטון.

1.

א. ציין מקרים בהם בין שני גופים קיימת אינטראקציה שגורמת להם להימשך זה לזה או להתרחק זה מזה.

ב. תאר את האינטראקציות שצינת בסעיף הקודם באמצעות הכוחות.

ג. הגדר את המונח כוח.

2.

א. הוכח שכוחות האינטראקציה (כוחות הפעולה והתגובה) שווים בגודלם ומנוגדים בכיוונם.

ב. נסח את החוק השלישי של ניוטון.

3.

רשום את המאפיינים של כוחות האינטראקציה.

4.

בכל אחד מהמקרים הבאים ציין מהי האינטראקציה המתרחשת וקבע מהם כוחות האינטראקציה.

א. כדור מתנגש בקיר ומוחזר ממנו.

ב. מוט ברזל הנמשך למגנט.

ג. אדם דוחף תיבה.

ד. גוף נע על משטח אופקי בתאווה עד לעצירה.

ה. גוף נופל נפילה חופשית.

ו. בלון נפוח שמשחרר ממנו האוויר ונע באופן אקראי בחדר.

2 + 3: יחידת הכוח וכוחות מכניים.

5.

א. הגדר את יחידת הכוח ניוטון.

ב. התבסס על הגדרת היחידה ניוטון וחשב את כוח הכובד הפועל על פני כדור הארץ על הגופים הבאים, שמסותיהם:

1. 1 kg

2. 0.2 kg

3. 0.1 kg

4. 10 kg

6.

חשב את כוח הכובד הפועל על גוף שמסתו 9 kg במקרים הבאים:

א. על פני כדור הארץ.

ב. על פני הירח.

ג. על פני כוכב הלכת צדק. נתון שכוו הכובד על פני צדק גדול פי 2.4 מכוו הכובד על פני כדור הארץ.

7.

נתון שהמסה המקסימלית שאדם מסוים יכול לשאת על פני כדור הארץ היא 80 kg . מהי המסה המקסימלית שיכול אדם זה לשאת אילו היה יכול להימצא על פני כוכב הלכת צדק.

8.

א. הגדר "כוח נורמלי".

ב. ציין מספר תכונות של הכוח הנורמלי.

9.

נתון שהכוח הנורמלי המקסימלי שיכול משטח עץ אופקי להפעיל הוא 1000 N . מצא, במקרים הבאים, את המסה המקסימלית שניתן להניח על משטח זה מבלי שישבר:

1. המשטח נמצא על פני כדור הארץ.

2. המשטח נמצא על פני הירח.

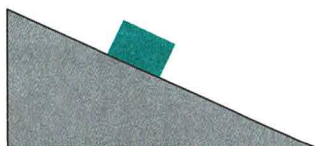
10.

קבע את כיוון הכוח הנורמלי בכל אחד מהמקרים הבאים:

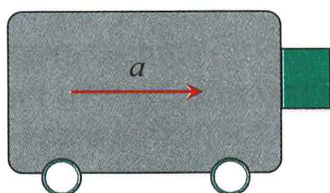
א.



ב.



ג.



מפעילות על קצוות הקפיץ.

11.

א. הגדר את המתיחות בחוט.

ב. מהו התנאי שצריך להתקיים על מנת שהחוט יהיה מתוח.

12.

א. קבע באילו מקרים המתיחות לאורך חוט היא קבועה.

ב. קבע באילו מקרים המתיחות לאורך חוט אינה קבועה.

13.

א. הסבר מהו קפיץ ומהן תכונותיו.

ב. הגדר מהו כוח הקפיץ וציין את התכונות של כוח זה.

ג. הסבר את המשמעות הפיזיקלית של קבוע הקפיץ וציין את יחידותיו.

ד. הסבר איך ניתן למדוד את קבוע הקפיץ.

14.

נתונים שני קפיצים. קפיץ 1 שקבוע הקפיץ שלו $k_1 = 40 \text{ N/m}$ וקפיץ 2 שקבוע הקפיץ שלו $k_2 = 60 \text{ N/m}$.

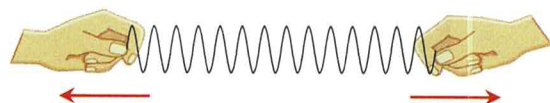
א. הסבר את המשמעות הפיזיקלית של קבוע הקפיץ לגבי כל אחד משני הקפיצים הנתונים.

ב. קבע איזה מבין שני הקפיצים קל יותר לכווץ בשיעור נתון $\Delta \ell$.

ג. קושרים קצה אחד של כל אחד משני הקפיצים 1 ו-2 לקיר ומפעילים על הקצה האחר שלהם כוחות F_1 ו- F_2 , בהתאמה. חשב את היחס F_2/F_1 אם נתון ששני הקפיצים מתארכים באותה מידה.

15.

אדם מחזיק את שני הקצוות של קפיץ באמצעות שתי ידיו ומושך את הקצוות כלפי חוץ כפי שמתואר בתרשים הבא:



נתון שקבוע הקפיץ הוא 60 N/m ושכתיבאה מהפעלת הכוח הוא מתארך ב- 12 cm .

א. חשב את גודלו של הכוח שהקפיץ מפעיל על כל אחת משתי ידיו של התלמיד.

ב. חשב את הכוח שכל אחת משתי הכפות

16.

על מנת למדוד את הקבוע של קפיץ מסוים, ביצע תלמיד את הניסוי הבא:

הוא קשר קצה אחד של הקפיץ לנקודה קבועה ותלה על הקצה האחר שלו משקולות בעלות מסות שונות, ולכל משקולת מדד התלמיד את התארכות הקפיץ $\Delta \ell$. התוצאות שקיבל מתוארות בטבלה שלפניך:

$\Delta \ell (\text{cm})$	$m (\text{g})$
2.5	50
5.0	100
7.5	150
10.0	200
12.5	250
15.0	300
17.5	350

א. העזר בטבלה הנתונה והכן טבלה נוספת המתארת את התארכות הקפיץ כפונקציה של הכוח הפועל עליו.

ב. קבע איזה מבין שני המשתנים בטבלה שהכנת הוא משתנה בלתי תלוי ואיזה מהם הוא משתנה תלוי.

ג. העזר בטבלה ושרטט גרף המתאר את המשתנה התלוי כפונקציה של המשתנה הבלתי תלוי.

ד. העזר בגרף ששרטטת וחשב את קבוע הקפיץ.

5. ניתוח בעיות בחוק השלישי של ניוטון

17.

רכב פרטי ומשאית מתנגשים זה בזה.

א. האם נכון לקבוע שבהתנגשות זו הרכב הכבד יותר הפעיל כוח רב יותר על הרכב השני? נמק.

ב. הסבר מדוע סביר להניח כי בהתנגשות זו הרכב הפרטי ניזוק יותר מאשר המשאית.

18.

גוף נופל נפילה חופשית על פני כדור הארץ (התנגדות האוויר זניחה).

א. קבע מהו הכוח הפועל על הגוף במהלך נפילתו וציין מהו כוח התגובה לכוח זה.

ב. הסבר למה הגוף הוא שנע לכיוון מרכז כדור הארץ וכדור הארץ נשאר במנוחה, ואינו נע לכיוון הגוף.

19.

כאשר סוס גורר עגלה, הכוח שהסוס מפעיל על העגלה שווה בגודלו ומנוגד בכיוונו לכוח שהעגלה מפעילה עליו. הסבר איך בכל זאת מצליח הסוס לגרור את העגלה.



20.

תלמיד קושר קצה אחד של חוט לקיר ומושך בקצהו האחר בכוח של 80 N . לאחר מכן מחזיק התלמיד את קצוות החוט בשתי ידיו ומפעיל על כל קצה כוח של 80 N . האם נכון לקבוע שהמתיחות בחוט במקרה השני גדולה יותר מהמתיחות בו במקרה הראשון? הסבר את תשובתך.

21.

ילד יכול להפעיל בכל אחת משתי ידיו כוח מקסימלי של 120 N . הילד מחזיק בקצוות חוט ומושך אותם כלפי חוץ כך שהוא מפעיל על כל קצה את הכוח המקסימלי של 120 N . קבע האם החוט נקרע, אם נתון שהוא יכול לשאת במתיחות מקסימלית של 200 N . הסבר את תשובתך.

24.

על העגלות המתוארות בתרשים שלפניך פועלים כוחות משיכה כתוצאה מהמצאות שני מגנטים חזקים המוצמדים לעגלות. כתוצאה מכוחות אלה הקפיצים 1 ו-2 המחוברים לעגלות 1 ו-2 בהתאמה, מתארכים. נתון שקפיץ 2 מתארך פי 2 מהתארכות הקפיץ 1, קבוע הקפיץ 1 הוא k_1 וקבוע הקפיץ 2 הוא k_2 .



- קבע האם k_2 ו- k_1 שווים, אם שווים, הסבר. אחרת, מצא את היחס k_2/k_1 .
- האם התארכות הקפיצים תלויה ביחס בין המסות של העגלות? נתון שהמשטח עליו מונחות העגלות הוא חלק.

22.

תלמיד קושר קצה אחד של קפיץ לנקודה קבועה ומפעיל על הקצה האחר שלו כוח שגודלו F בכיוון שגורם לקפיץ להתארך. כתוצאה מכך הקפיץ מתארך בשיעור $\Delta\ell_1$. לאחר מכן התלמיד משחרר את הקפיץ מהקיר ומחזיק בקצהו האחד, והחבר שלו מחזיק בקצהו השני כשכל אחד מהם מפעיל כוח F (אותו כוח כמו קודם). הפעם הקפיץ מתארך בשיעור $\Delta\ell_2$.

- רשום את זוגות כוחות האינטראקציה הפועלים בקצוות הקפיץ בשני המקרים.
- ציין מהם הכוחות הפועלים על הקפיץ בכל אחד משני המקרים.
- מצא את היחס בין $\Delta\ell_1$ ו- $\Delta\ell_2$.

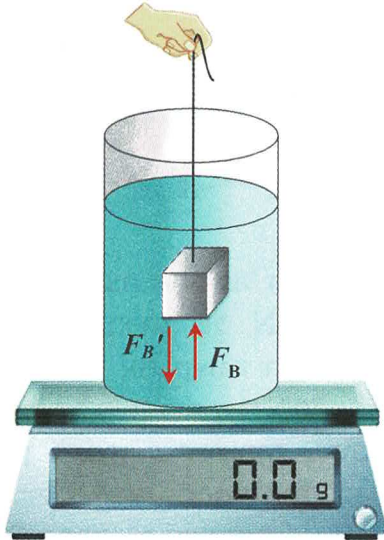
23.

- גוף מונח על משטח אופקי.
- ציין מהם הכוחות הפועלים על הגוף וקבע מהו הקשר בין כוחות אלה.
- קבע האם הכוחות שציינת בסעיף הקודם הם כוחות אינטראקציה (כוחות פעולה ותגובה). אם השבת ב"כן" הסבר למה, ואם השבת ב"לא" ציין מהו כוח התגובה לכל אחד משני כוחות אלה.

מכניקה ניוטונית – כרך א פרק 5: כוחות והחוק השלישי של ניוטון

את קריאת המאזניים. התלמיד מוצא שקריאת המאזניים היא 12 N .

לאחר מכן התלמיד מכניס למים שבמיכל משקלות הקשורה לקצה חוט ומחזיק בקצה האחר של החוט כך שהמשקולת נמצאת בתוך המים ואינה נוגעת במיכל (ראה תרשים).



התלמיד מגלה כי לאחר הכנסת המשקולת לתוך המים קריאת המאזניים גדלה ל- 18 N .

- א. חשב את מסת הכלי כולל המים שבתוכו.
- ב. מצא את גודלו וכיוונו של הכוח שהמשקולת מפעילה על הנוזל.
- ג. מצא את גודלו וכיוונו של כוח העילוי שהנוזל מפעיל על המשקולת.
- ד. מהו התנאי על מסת הגוף על מנת שיצוף, בהנחה שכוח העילוי הפועל על הגוף קבוע ושווה לכוח שחישבת בסעיף הקודם.

ה. נתון שמסת המשקולת היא 0.7 kg וכוח העילוי הפועל עליה בתוך המים הוא 6 N .

1. מצא את כוח הכובד הפועל על המשקולת.
2. מצא את משקל המשקולת כשהיא בתוך המים.

6. המשקל

25.

- א. הגדר "משקל" וקבע מהן היחידות של גודל פיזיקלי זה.
- ב. קבע באילו מקרים משקלו של גוף שווה לכוח הגרביטציה (כוח הכובד) שפועל עליו ומתי הוא לא שווה לו.

26.

קושרים קצה קפיץ לתקרה וקושרים לקצה האחר משקולת. כתוצאה מכך מתארך הקפיץ ב- 0.15 m . נתון שקבוע הקפיץ הוא 100 N/m .

- א. חשב את גודל הכוח שהקפיץ מפעיל על המשקולת.
- ב. חשב את גודל כוח הכובד הפועל על המשקולת.
- ג. חשב את מסת המשקולת.

27.

נתון שהמערכת המתוארת בשאלה הקודמת (אותו קפיץ ואותה משקולת) נמצאת בתוך מעלית העולה כלפי מעלה בתאוצה. נתון שהתארכות הקפיץ במקרה זה היא 0.2 m .

- א. חשב את כוח הכובד שפועל על המשקולת.
- ב. חשב את הכוח שהקפיץ מפעיל על המשקולת.
- ג. מצא את משקל המשקולת במקרה המתואר בשאלה זו.

28.

מניחים גוף שמסתו 3 kg על מאזניים המונחים על משטח אופקי. נתון שהמאזניים מודדים כוח.

- א. חשב את כוח הכובד שפועל על הגוף.
- ב. חשב את הכוח שהגוף מפעיל על המאזניים.
- ג. חשב את משקלו של הגוף.

29.

תלמיד מניח כלי עשוי זכוכית והמכיל מים על מאזני כוח הנמצאים על משטח אופקי ורושם